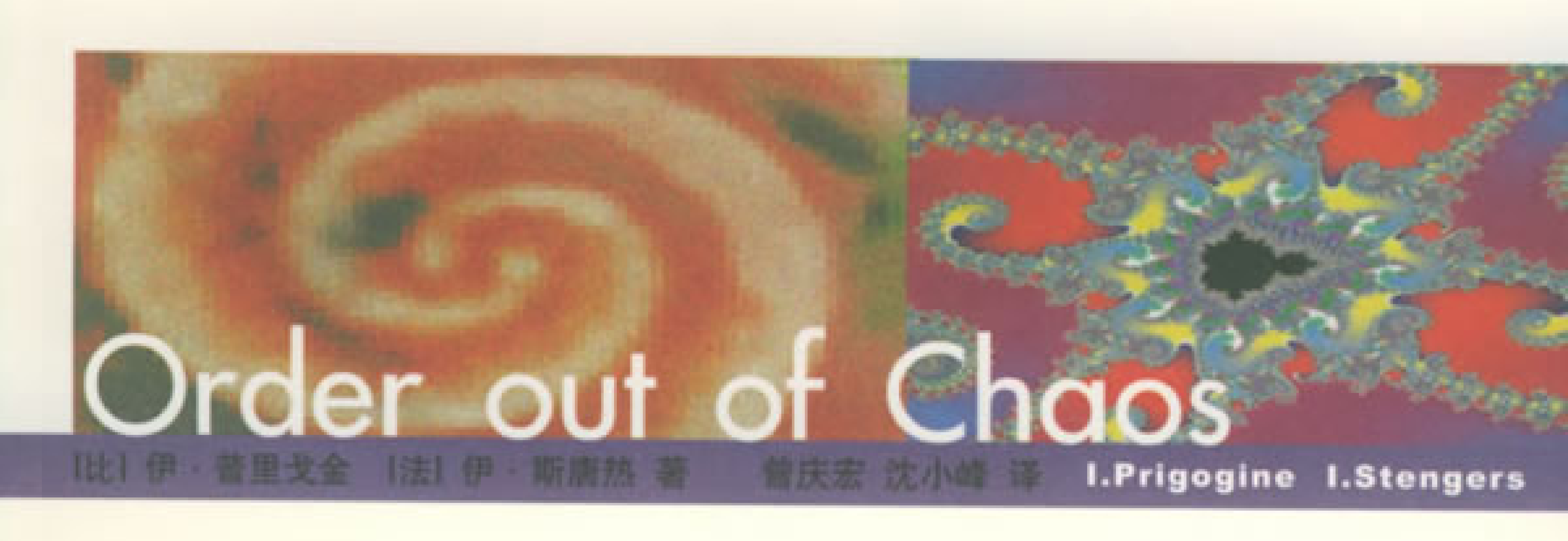


开放人文

从混沌到有序

人与自然的新对话



[比] 伊·普里戈金 [法] 伊·斯唐热 著 曾庆宏 沈小峰 译 I.Prigogine I.Stengers

上海世纪出版集团

导论：对科学的挑战

1

1686年4月28日是人类历史上最伟大的日子之一，这样说并不夸张。牛顿在这一天向伦敦皇家学会提交了他的著作《自然哲学的数学原理》。这部著作总结了运动的基本定律，清晰地表述了质量、加速度、惯性等这样一些我们至今仍在使用的基本概念。影响最大的恐怕要算这部《原理》的第三编，即《论宇宙系统》，因为其中包含了对万有引力定律的叙述。与牛顿同时代的人立刻抓住了该书的这个突出的重要之点，无论在伦敦还是在巴黎，"引力"成了人们谈论的主要话题。

从牛顿的《原理》到现在，已经过了三个世纪。科学以难以置信的速度得到了发展，越来越深入我们的生活。我们的科学视野已大到简直是异想天开的地步。在微观范围内，基本粒子物理学所研究的对象已涉及到 10^{-15} 厘米和 10^{-22} 秒数量级的物理尺度。而在宇观范围内，宇宙学却把我们带到 10^{10} 年的数量级，即所谓"宇宙的年龄"。科学与技术的联系比

以往任何时候都更加紧密。生物工程学和信息技术的新进展以及其他一些因素,将使我们的社会生活发生根本的变化。

与这些量的增长相提并论的是质的深刻变化，其反响不仅远远超出科学的本来意义,而且还影响到自然界的形象。西方科学的伟大奠基者们强调自然定律的普适性和永恒性，他们要表述的是符合真正理性理想的普遍图式。正如罗杰·豪歇尔(Roger Hausheer)在艾赛亚·伯林(Isaiah Berlin)的《反潮流》(*Against the Current*)一书的导言中极好地表述的那样:“他们寻求包罗万象的图式,普适的统一框架,在这些框架中,所有存在的事物都可以被表明是系统地，即逻辑地或因果地相互连接着的。他们寻求广泛的结构,这结构中不应为‘自然发生’或‘自动发展’留下空隙,在那里所发生的一切,都应至少在原则上完全可以用不变的普遍定律来解释。”

围绕这一问题所发生的故事相当富有戏剧性：有过好几次这样的时刻,似乎寻找普遍图式的雄伟计划已接近完成了,一种基础级的东西似乎已经露出了地面,物质的一切性质都可以从这个基础上推演出来。提到这种时刻,人们会想起玻尔对原子模型的著名的表述,他的原子模型把物质归纳成由电子和质子组成的简单的行星系统。另一次大振人心的时刻是当爱因斯坦想把物理学的一切定律都浓缩到一个“统一场论”中去的时候发生的。当时,在统一那些在自然界中已被发现的几种基本力方面,确实取得了很大进展。然而,这个基本层次的东西毕竟只是一个幻象。无论从哪个方面去看,我们所发现的都是演进的、多样化和不稳定的。令人惊奇的是,在所有层次上,无论在基本粒子领域中,还是在生物学中,抑或在天体物理学中(它研究膨胀着的宇宙以及黑洞的形成),情形都是如此。

正如我们在序言中所说的，人们对自然的看法正在经历着一个向

着多重性、暂时性和复杂性发展的根本变化。奇怪的是，在自然界中发现的意想不到的复杂性并没有减缓科学的前进，恰恰相反，它促成了一些新的概念结构的产生，这些新的概念结构正是我们今天认识物质世界(包括我们自己在内的世界)所必需的。我们要在这本书中加以分析的，正是这种在科学史上不曾有过的新形势。

我们在有关科学和自然的概念上的转变，很难和另一个情节分开，这就是科学所带来的感情。伴随着每个新的智能计划，总会出现新的希望、恐惧和期待。经典科学中所强调的是一些与时间无关的定律。我们将看到，一旦测量出某个系统的特殊状态，就会提出一些可逆的经典科学定律来，以决定该系统的未来，恰如这些定律已经确定出该系统的过去一样。对于在变化着的现象背后所隐藏的某个永恒真理的探求，自然唤起了我们的热忱。但是用这样的方法描述的自然，事实上是被贬低了，这又使我们受到了打击，因为正是由于科学的成功，自然被证明只是一部自动机，一个机器人。

从古希腊原子论者的时代起，在西方思想中便出现了一种冲动，想把自然界的多样性归结为一个由幻象结成的蛛网。卢克莱修跟随在他的老师德谟克利特和伊壁鸠鲁之后写道，世界“不过”是原子和虚空，并且要我们去寻找那些隐藏在表面现象背后的东西。他说：“然而，请承认那些你必须允许它们在这世界中存在却又看不见的粒子，免得你会不相信我的话，因为人眼是无法感知这些基本物体的。”

但是，众所周知，驱使希腊原子论者工作的动力并不是贬低自然，而是要使人们从恐惧中，从对任何超自然物的恐惧、对任何凌驾于人和自然之上的秩序的恐惧中解放出来。卢克莱修一遍又一遍地重复说，我们没有什么可怕的，世界的本质就是原子在虚空中的不断变化着的结合。

现代科学把这一基本上是伦理学的态度转变成看上去像是一种已有真理的东西，而这个真理，即把自然归结为原子和虚空的说法，又进一步引出了莱诺伯(Lenoble)称之为“现代人的忧虑”的情形。我们怎能在这随机的原子世界中认出我们自己呢？科学一定是根据人与自然决裂这种思想定义的吗？“一切物体，苍穹、星辰、地球及其王国，都不等同于最低级的思维，因为思维在自身中知道所有这些物体，而这些物体却什么也不知道。”这个帕斯卡的“箴言”表达的是同样的疏远感情，这种疏远感情我们在当代科学家如雅克·莫诺*那里也找到了：

> 人类一定会从千年的梦幻中苏醒过来；这样，人类就会发现他自身是完全孤独的，与外界根本隔绝的。他最后会认识到，他就像一个吉普赛人那样生活在异国他乡的边境上。在那个世界里，对他所弹奏的音乐是充耳不闻的，对他的希望、苦痛和罪恶也是漠不关心的。

这是一个佯谬。分子生物学中的一个辉煌成就，即莫诺积极参与的对基因密码的破译，却以悲剧的调子告终。我们懂得了，正是这个进步才使我们成为宇宙的吉普赛人。我们怎样解释这个局面呢？难道科学不是一种交流的手段，不是一种人与自然间的对话吗？

在过去，人们常常指出在人的世界与被想象得完全不同的自然的世界之间有着巨大的差异。维科(Vico)在其《新科学》(*The New Science*)一书里有一段著名的话，十分生动地描写了这一点：

---

* 莫诺(Jacques Monod，1910—1976)，法国生物化学家，遗传学家，1965年获诺贝尔生理和医学奖。——译者

……在那包藏着最古老的古董的漆黑之夜，在离开我们如此遥远的地方，闪耀着永恒的、永不衰竭的真理之光。毫无疑问，文明社会的世界肯定是人创造的，因此它的原理是在我们人的思维的变化之中发现的。无论是谁，只要想到这点，就禁不住感到惊奇：哲学家们竟会倾其全部精力去研究那个由上帝创造的因而也只有上帝自己才能认识的自然世界，他们竟会忽略对由各个国家所组成的世界(或民众世界)的研究，而这是人创造的世界，因而人能够去认识它。

今天，研究工作使我们距离人与自然的对立越来越远，本书的主要目的之一就是要说明，代替这两者的决裂和对立的，是我们关于人的认识与自然的不断增长的一致性。

2

在过去，人们对自然的发问是采用极为多种多样的形式的。修谟人发明了写字，修谟的牧师们曾经推测："未来"可能是以某种隐匿的方式写在现在发生在我们周围的事件之中的。他们甚至把魔术的因素与推理的因素混合起来，使他们的这种信念系统化。在这种意义上，我们可以说，十七世纪建立起来的西方科学仅仅是打开了人与自然之间的永不完结的对话的新篇章。

亚历山大·柯伊莱是用所谓"实验"的术语来定义近代科学所带来的发明创造的。近代科学的基础在于发现与自然沟通的新的特殊形式，即，在于相信自然界能够对实验所提出的问题作出响应。我们怎样才能更精确地定义这个实验的对话呢？实验并不只是对所发生的事实进行忠实的观察，也不只是寻找诸现象之间的经验联系，而且是事先提出一

种假设，假设在理论概念与实际观测之间有着某种系统的相互作用。

当科学家们提出那个需要自然作出答复的问题，而发现他们能够看到这个谜底是多么吻合的时候，他们以数百种不同的方式表达了他们的惊奇。在这种意义上，科学像是两个对手之间的赌博，在这场赌博中我们不得不猜测某个现实的行为，而这些行为与我们的信念、我们的抱负、我们的欲望无关。自然界不可能听任摆布地说那些我们要它说的话，科学研究不是独白。正因为卷入了冒险，才使这场赌博变得无比紧张和惊心动魄。

但是，西方科学的独到之处远远不是这种方法论的考虑所能描述无遗的。卡尔·波普尔(Karl Popper)在讨论科学理性的正统描述时不得不承认，在最后的分析中，合理的科学把它的存在归功于它的成功。科学方法之可用仅仅是由于我们事先想象的模型与实验的结果惊人地一致。科学是冒险的游戏，但它好像已经发现了一些问题，对于这些问题，自然所给出的答案是始终如一的。

西方科学的成功是一个历史事实，是不可先验地预言的，但又是不可被抹煞的。现代科学的惊人成功已经导致我们与自然的关系上发生了不可逆的转化。在这个意义上，可以合法地使用“科学革命”这个词儿。人类的历史是由一个又一个转折点所标记的，是由一些导致了不可逆变化的场景的奇特衔接所标记的。这种关键事件之一就是“新石器时代的革命”。不过在那里，也像“选择”标志着生物进化的情形一样，我们在今天只能通过推测的方法去进行。而在科学进化中，却有着关于各个决定性事件的丰富的资料。所谓“新石器时代的革命”经历了几千年。概略地说，科学革命是三百年前才开始的。我们有一个像是惟一的机会来理解促成这场革命的“偶然性”与“必然性”的特殊而明了的混合。

科学开创了与自然的一次成功的对话。另一方面，这次对话的首要成果就是发现了一个沉默的世界。这就是经典科学的佯谬。它为人们揭露了一个僵死的、被动的自然，其行为就像是一台自动机，一旦给它编好程序，它就按照程序中描述的规则不停地运行下去。在这种意义上，与自然的对话把人从自然界中孤立出来，而不是使人和自然更加密切。人类推理的胜利转变成一个令人悲伤的真理，似乎科学把它所接触到的一切都贬低了。

近代科学使它的反对者以及部分支持者都感到恐惧。反对者把它看作是致命的危险，支持者从科学所"发现"的人的孤独中看到了必须为这个新理性付出的代价。

与经典科学相连的文化上的动荡不安至少可以部分地说明科学在社会中所处位置不稳定的原因。它引起了对于理性的那些很难捉摸的含义的一种大胆的臆测，但它也招致了严厉的拒绝。稍后，我们再回过头来论述当代的反科学运动。现在让我们举一个较早一点的例子，即1920年德国的非理性运动，它构成了量子力学的文化背景。在与因果性、决定论、约化论以及理性等这样一些概念相等同的科学的对立面，有一个思想的狂潮，这些思想被科学所否定，但却被看作是自然界基本非理性的体现。于是，生命、命运、自由、自发性便成了一个不通情理的阴暗地狱的种种表现。用不着深入到使这种对科学的排除运动得以十分激烈的特殊的社会政治背景中去，我们就可以肯定，它说明了与经典科学相伴的危险。对于人们认为有意义的一组经验，只允许有一种主观的含义。这样一来，科学就冒着赋予生命、命运、自由、自发性等以一种讨厌的动力而把它们推向非理性王国中去的危险。

如李约瑟所强调的那样，西方思想总是在两个世界之间摆动，一个是被看作自动机的世界，另一个是上帝统治着宇宙的神学世界。李约瑟

把这称为"典型的欧洲痴呆病"。事实上,这两种观点是联在一起的,自动机需要一个外部的上帝。

我们当真必须作出这种悲剧性的选择吗?我们一定要在导致疏远的科学与反科学的形而上学自然观这两者之间进行选择吗?我们认为,这样的选择不再是必要的了,因为科学今天所经历的变化产生了一种从根本上说是新的形势。最近的科学进化给了我们一个独有的机会去重新考虑它在总的文化中的地位。近代科学起源于欧洲十七世纪这样一个特殊的历史环境。现在我们正接近二十世纪末,看来,科学为我们带来某种更加普适的信息,这信息关系到人与自然以及人与人之间的相互作用。

3

什么是经典科学的假定,使我们由这些假定而相信科学今天已经解放了它自己呢?一般说来,这些假定是以这样的基本信念为中心的,即相信在某个层次上世界是简单的,且为一些时间可逆的基本定律所支配。今天看来,这是一种过分的简单化。我们可以把它比作是把一些建筑物归结为几堆砖。然而用同一些砖,我们可以建成一座工厂、一座宫殿,或一座教堂。从建筑物整体的层次上,我们把它理解为一个时间的创造物,理解为某种文化、某种社会、某种风格的产物。但是,这里还有一个明显的问题:由于没有谁要去建造大自然,我们必须对它的所谓"砖"(就是说对它的微观活动性)给出一种描述,以便说明这个建造的过程。

经典科学的问题所在,就是它在其自身之中说明了在西方思想史中贯彻始终的两分性。用柏拉图的表达方法,只有那不变的思想世界才被传统地认为是"智慧的阳光所照亮的"。在同样的意义上,只有永恒的

定律才被看作是科学理性的表示。暂时性则如同幻影一般受到歧视。今天这已不再是真的了。我们已经发现,不可逆性远不是什么幻影,而是在自然界中起着重要作用,并且处在大多数自组织过程的始端。我们发现我们自己处在一个可逆性和决定论只适用于有限的简单情况,而不可逆性和随机性却占统治地位的世界之中。

对时间和复杂性的排除是经典定义上的科学事业所引出的文化争端的中心。这些概念的挑战对于我们要描述的科学形变而言也是有决定意义的。阿瑟·爱丁顿*在他的巨著《物质世界的本性》(*The Nature of the Physical World*)一书中,引入了第一级定律与第二级定律的区分。"第一级定律"控制着单个粒子的行为;"第二级定律"可适用于原子或分子的集合。坚持第二级定律,就是强调对基本行为的描述还不足以把系统作为一个整体去认识。按照爱丁顿的看法,第二级定律的一个杰出范例,就是在物理学上引入"时间之矢"这个概念的热力学第二定律。他写道:"从科学哲学的观点来看,我认为,与熵相连的概念一定会被当作十九世纪对科学思想的伟大贡献。因为它标志着对科学需要加以注意的任何事物都是用对客体的微观解剖来发现的这样一种观点的反动。"今天,这个趋势已被戏剧般地加以扩大了。

近代科学的一些最伟大的成功确实是在微观的(即分子、原子、基本粒子的)层次上发现的。例如,分子生物学由于分离出在生命机制中起根本作用的特殊分子而获得了巨大的成就。实际上,这个成就是如此地压倒一切,以致对许多科学家来说,研究的目的,按爱丁顿的说法,已经变成"对客体的微观解剖"了。然而,热力学第二定律向这样的一种自然概念(它消除复杂性并把复杂性约化为某个隐藏着的世界的简单性)第

---

* 爱丁顿(A.Eddington,1882—1944),英国天体物理学家。曾任英国天文台台长。——译者

一次提出了挑战。今天,我们的兴趣正从“实体”转移到“关系”,转移到“信息”,转移到“时间”上。

这个观点上的变化并不是出自某种武断。在物理学里,它是由那些谁也不可能先知的新发现强加给我们的。谁曾预料过大多数的(而且也许是所有的)基本粒子被证明是不稳定的呢?谁曾期望过,对膨胀着的宇宙的实验验证,使我们能去想象整个世界的历史呢?

在二十世纪末,我们学会了更好地理解曾为当代物理学定形的两次伟大革命(量子力学和相对论)的意义。这两次伟大革命的起始点是试图对经典力学进行校正并把新发现的两个普适常数纳入其中。今天,局面已经改观。量子力学为我们给出了描述基本粒子不断相互转化的理论框架。同样,广义相对论已经成为使我们能够描述我们宇宙早期历史的基本理论。

我们的宇宙具有一个多元论的复杂特点。结构可能消失,也可能出现。就我们所知,有些过程能够用决定论的方程很好地加以描述,但另一些却涉及概率过程。

那么,我们怎么能克服这些概念之间的明显的矛盾呢?我们生活在一个单一的宇宙之中。我们将看到,我们正在开始对这些问题的意义进行估价。而且,我们现在对我们观察和描述的各种现象所赋予的重要性,与经典物理学对它们所赋予的重要性相比,有相当大的差别,甚至是正好相反。我们已经提到过,在经典物理学中,基本的过程被认为是决定论的和可逆的。涉及随机性和不可逆性的过程则被认为是例外。今天,我们在各处都可看到不可逆过程所起的作用,看到涨落所起的作用。在我们看来,经典物理学所考虑的模型只在一些有限的场合发生,有些场合我们能够人为地造出来,例如把物质放入一个盒子里,然后等待其达到平衡态。

人为的过程可以是决定论的和可逆的。自然的过程包含着随机性和不可逆性的基本要素。这就导致了一种新的物质观，在其中，物质不再是机械论世界观中所描述的那种被动的实体，而是与自发的活性相联的。这个转变是如此深远，所以我们在序言中指出，我们真的能够说到人与自然的新的对话。

4

本书讨论从经典科学的黄金时代到今天的科学上的这个概念的变迁。为描述这一变迁，我们可以选择多种方法。我们可以研究基本粒子问题，我们可以追溯近来在天体物理学中的引人瞩目的进展。这些都是可能为科学划出前沿的题目。但是我们在序言中说过，在过去的几年中，就在我们这个层次上发现了自然界如此繁多的新特点，以致我们决定把研究集中到这个中间层次上，集中到基本上属于宏观世界(包括原子、分子，特别是生物分子)的一些问题上。还应强调，在各个层次上，无论是基本粒子、化学、生物学或宇宙学的层次上，科学的进化是在一些差不多平行的线上进行的。在每个领域，自组织、复杂性和时间都起着一种新的意想不到的作用。

因此，我们的目的是从一个确定的观点出发，考察三个世纪来科学进步的意义。在我们选择研究材料的方法上，无疑含有主观的因素。时间的问题确实是我们研究的中心所在，我们当中的一个人已经从事这个研究一辈子了。当他还是个青年学生，在布鲁塞尔大学初次接触到物理学和化学的时候，使他感到惊奇的是，科学对于"时间"竟谈得如此之少，特别是因为他的早年教育主要是以历史和考古为中心的。这种惊奇可能把他引导到两种态度上去，关于这两种态度我们都找到了过去的例证。一种是抛弃这个问题，因为在经典科学里看来是没有"时间"的位

置的；另一种态度就是去寻找理解自然的其他途径，在其中时间将起着不同的但更为根本的作用。我们只要举出我们时代的两位哲学家为例，柏格森和怀特海就选择了这样的道路。前者的见解被称作“实证主义”的，后者的见解叫作“形而上学”的。

但是，这里还有第三条道路，就是要问一问，在物理学和化学中惯常考虑的时间演化的简单性，是不是由于这样的事实，即把注意力主要放到了某些非常简单化的场合，放到了我们提到过的砖堆上而不是教堂上。

本书分为三部分。第一部分讨论经典科学的胜利以及这个胜利所带来的文化上的后果。最初，科学受到了热情的恭维。随后，我们将叙述文化上的两极分化，它是经典科学的存在及其惊人的成功所带来的结果。这一成功是被当作成功(也许要限制其含义)来接受呢，还是一定要把科学方法本身当作偏见或错觉而加以拒绝呢？两种选择都导致同一结果——通常所说的“两种文化”即自然科学与人文科学之间的抵触。

自从经典科学形成以来，这些问题在西方思想中起着基本的作用。我们一而再、再而三地遇到这个问题：“怎样选择？”在这个问题中，艾赛亚·伯林已经正确地看出了自然科学与人文科学之间分裂的起点：

> 特殊和惟一对重复和普适，具体对抽象，永恒的运动对静止，内部对外部，质对量，受文明制约的对无时间限制的原则，作为人的一种永恒状态的精神奋斗与自我改造对和平、有序、最终谐和以及人类一切合理希望得到满足的可能性(及合意性)——这些就是形成对比的一些方面。

我们花了很大篇幅讨论经典力学。的确，从我们的观点来看，这是最有利的要点，从这个要点我们可以细看当今科学的变化。经典力学以特别清楚和显著的方式表达了静止的自然观。这里，时间显然被约化为一个参数，未来和过去是等价的。诚然，量子论已经提出了许多经典动力学未能解决的新问题。但它仍然保留了不少经典动力学的概念立场，尤其是对时间和过程而言。

早在十九世纪初，正当经典科学获得胜利，牛顿的纲领统治了法兰西科学而法兰西科学又统治了欧洲的时候，对牛顿结构的首次威胁就已经隐约可见了。在我们研究的第二部分里，我们将从傅里叶表述热传播定律时的第一次挑战开始，跟踪牛顿引力学说的对手——热学的发展。实际上，傅里叶的热传播定律就是对经典力学中某个不可想象的事物即不可逆过程的第一次定量的描述。

热学的两个后代，即能量转换的学说和热机的学说，产生了第一个"非经典"的科学——热力学。热力学的最初始的贡献就是著名的第二定律，它在物理学中引入了时间之矢。这个引入是更全面的知识进步的一部分。十九世纪真是进化的世纪，生物学、地质学和社会学都强调了演化的过程，即不断增加着复杂性的过程。至于热力学，它的产生正是基于对两种过程的区分：与时间的方向无关的可逆过程和与时间的方向有关的不可逆过程。我们将在后面看到它们的一些例子。正是为了区分这两种过程才引入了熵的概念，因为熵的增加仅仅是由于不可逆过程。

在十九世纪，热力学变化的终态是科学研究的重点，这是平衡态热力学。不可逆过程被当作是讨厌的东西，是干扰，是不值得研究的题目而遭到蔑视。但今天这种情况完全改变了。我们现在知道，在远离平衡态的地方，一些新型的结构可能自发地出现。在远离平衡态的条件下，

我们可能得到从无序、从热混沌到有序的转变。可能产生一些物质的新力学态，反映了给定系统与其周围环境相互作用的态。我们把这些新的结构叫作耗散结构，以强调耗散过程在这些结构的形成中所起的建设性的作用。

本书叙述了一些新的方法，这些方法是近年来为处理耗散结构的产生和变化而发展起来的。在这里我们能找到一些像主旋律一样在本书始终反复出现的关键词：非线性，不稳定性，涨落。它们已经开始把我们的自然观渗透到甚至超出物理学和化学的固有领域之外。

我们在讨论自然科学与人文科学的对立时，曾引述过艾赛亚·伯林的话，他把特殊和惟一列在与重复和普适相对的地位。但是值得指出的是，当我们从平衡态走到远离平衡态时，我们便离开了重复和普适而达到了特殊和惟一。诚然，平衡态的定律是普适的，近于平衡态的物质是以“重复”的方式运动的。但另一方面，远离平衡态时却出现了各种各样的机制，对应着发生各种各样耗散结构的可能性。例如，在远离平衡态的地方，我们可以看到化学钟的出现。化学钟就是以连贯的、有节奏的方式进行的化学反应。我们还能得到一些自组织过程，导致非平衡态晶体的不均匀结构。

我们要着重指出这一行为的出人意料的特点。对于化学反应是怎样发生的，我们每个人都有一种直觉的看法。我们想象在空间中浮动的分子彼此碰撞着，并以新的形式再现。我们看到的是混沌的行为，有点像原子论者在说到空气中飞扬的灰尘时所描述的那样。但在化学钟里，这个行为是十分不同的。虽然有点过于简化，但我们还是可以这样说，在化学钟里，所有分子以一定的时间间隔，同时改变它们的化学性质。如果可以把这些分子想象成是蓝色的或红色的，我们就会看到它们的颜色随着化学钟反应的节奏而变化。

显然，这种情形不能再用“混沌行为”的术语去描述了，一种新型的有序已经出现了。我们可以说它是一种新的相干性，一种分子之间的“通信”机制。但这种形式的通信只能在远离平衡态的条件下出现。令人十分感兴趣的是，这种形式的通信似乎是生物世界的惯例。这在实际上可被用来当作定义某个生物系统的恰当基础。

此外，耗散结构的类型严格地依赖于它们得以形成的那些条件。诸如地球引力场以及磁场等那样的外部场可能在自组织的选择机制上起着主要作用。

我们开始看到我们怎样能从化学出发，去建造复杂的结构，复杂的形式，其中的一些可能已是生命的先驱。看来可以肯定，这些远离平衡态的现象说明了物质具有一种根本的且出人意料的性质：从此物理学便可描述适应外部条件的结构。在相当简单的化学系统中我们遇到一种“前生物”的适应机制。用带有拟人化的语言来说，处于平衡态的物质是“瞎”的，但在远离平衡态的条件下，它开始能以它的机能去感知、去“考虑”外部世界(例如弱引力场或电场)的差别。

当然，生命起源问题仍然是一个困难的问题，我们不能设想这个问题的一个简单解就在我们眼前。但是从它的前景来看，生命不再和物理学的“常规”定律相对立(生命在和这些定律作斗争，以避免其衰亡的正常命运)，相反，生命好像在用一种特殊的方式表达着我们的生物圈得以寄身的那些条件，其中包括化学反应的非线性以及太阳辐射给予生物圈的远离平衡态的条件。

我们已经讨论了使我们能描述耗散结构形成的一些概念，例如分叉理论。值得指出的是，靠近分叉点的系统呈现出很大的涨落。这样的系统好像是在各种可能的进化方向之间“犹豫不决”，通常意义下的著名的大数定律被打破了。一个小的涨落可以引起一个全新的变化，这新

的变化将剧烈地改变该宏观系统的整个行为。人们无疑会把这些与社会现象进行类比，甚至与历史进行类比。我们远远不是将“偶然性”与“必然性”对立起来，我们现在看到这两者在描述远离平衡态的非线性系统时同样都是主要的。

就是这样，本书的前两部分讨论了两种互相矛盾的物理宇宙观：经典动力学的静止观点和与熵联在一起的进化观点。这两种观点之间的交锋已成为不可避免的了。但由于把不可逆性看作是一种幻影，一种近似，这场交锋被拖延了相当长的一段时间，正是人，在一个没有时间的宇宙中引入了时间。不过，把不可逆性约化成一个幻影或约化成一些近似，这种解决问题的办法不再能被接受。因为我们知道，不可逆性可能是有序的源泉，相干的源泉，组织的源泉。

我们再也不能避免这场交锋了。这就是本书第三部分的主题。我们叙述最初在经典力学中后来在量子力学中惯常使用的解决不可逆性问题的几种尝试。这里，玻耳兹曼*和吉布斯等人作出了开创性的工作。但是我们可以说，问题基本上仍未得到解决。如卡尔·波普尔所述，这是一个戏剧般的故事：起初，玻耳兹曼想，他已经对隐含在第二定律中的新的时间概念给出了一个客观的表述。但他和泽梅洛(Zermelo)等人辩论的结果却使他不得不退却下来。

在历史的光明中(或在历史的黑暗中)玻耳兹曼被打败了。虽然大家都承认玻耳兹曼是一位卓越的物理学家，然而按照所有被接受的标准，他被打败了。因为他从来不曾成功地阐明他的 $\mathscr{H}$ 定理的状态，他也没有解释清楚熵的增加……就

---

* 玻耳兹曼(L. Boltzman, 1844—1906)，奥地利物理学家，气体分子运动论奠基人之一。——译者

是这个压力使他丧失了对他自己的信任……

不可逆性的问题依然是一个引起激烈争论的题目。在热力学第二定律被发现的一百五十年之后，这怎么会可能呢？这个问题有许多方面的原因，有些是文化上的，有些是技术上的。在对时间的怀疑中，有一个文化上的成分。我们将在几种场合引述爱因斯坦的观点。他的判断是不再改变的：时间(和不可逆性一样)是一种幻影。事实上，爱因斯坦是在重复乔尔丹诺·布鲁诺在十六世纪写过的并且已经在几个世纪内成为科学信条的话："因此，宇宙是单一的、无限的、不动的……它不移动自身的位置……它不产生自身……它是不可毁灭的……它是不可改变的……" 在一段很长的时期内，布鲁诺的看法统治着西方世界的科学观。因此，主要来自工程科学和物理化学的不可逆性的闯入是被带着怀疑接受的，这一点并不奇怪。可是，除了文化上的原因之外，还有一些技术上的原因。所有想从动力学中"导出"不可逆性的尝试都必然要失败，因为不可逆性并不是一种普适的现象。我们可以想象一些严格可逆的情况，比如无摩擦的摆，或行星的运动。这个失败使人感到气馁，感到不可逆性的整个概念终于具有一个主观的来源。我们将相当详细地讨论这些问题。让我们在这里说，我们今天可以从一种不同的观点来看这一问题，因为我们现在知道有着不同类别的动力学系统。世界远不是均匀的。因此这个问题可以用不同的术语提出：能够"区分"过去和未来的那些动力学系统的特殊结构是什么？所涉及的最低复杂性是什么？

沿着这些路线已经取得了进步。现在我们已能对时间在自然界中的根源有更加确切的了解。这具有深远的意义。热力学第二定律，即熵定律，在宏观世界中引入了不可逆性。我们现在在微观层次上也能理解它的意义。我们将看到，第二定律相当于一种选择规则，相当于对初始

条件的一个限制，这个限制后来被热力学定律所传播。因此，第二定律为我们对自然的描述引入了一个新的不可缺少的要素。它是和动力学相一致的，但是它不可能从动力学导出。

玻耳兹曼已经认识到概率一定与不可逆性有密切的关系。仅当一个系统以某种足够随机的方式运行时，过去和未来的差别(因此还有不可逆性)才能进入它的描述中去。我们的分析证实了这种观点。的确，在对自然的决定论的描述中，时间之矢的意义是什么呢?假如未来已经以某种方式被包含在现在之中，现在也包含着过去，那么时间之矢还有什么意义呢?时间之矢是这样一种事实的表现，即未来并没有被给出，或者像法国诗人保尔·瓦莱利(Paul Valêry)所强调的那样，“时间是构造”。

我们日常生活的经验表明在时间与空间之间有着根本的区别。我们可以从空间中的一点移到另一点。但是，我们不能把时间倒过来。我们不能交换过去和未来。我们将看到，这个不可能性的感觉现在正在得到精确的科学含义。用某个无限的熵垒，可以把被允许的那些态和被热力学第二定律禁止的那些态区分开。在物理学中还有另外一些垒。其一就是光速，按照我们今天的观点，它是信号传播速度的极限。这个垒的存在是很重要的，假如不存在的话，因果性就会摔成碎片。同样，熵垒是为通信赋予某种意义的前提。想象一下，假如我们的未来对另一些人来说成了过去，那么将会发生什么事情!后面我们还要回到这个问题上来。

物理学的最近进展已经强调了时间的真实性。在这个过程中，时间的新的方面已经被揭示出来。对时间的关注贯穿在我们的整个世纪之中。让我们想一下爱因斯坦、普鲁斯特*、弗洛伊德、泰尔哈德**、皮尔斯

---

* 普鲁斯特(J.Proust, 1754—1826)，法国化学家。——译者

** 泰尔哈德(Teilhard, 1881—1955)，又译“德日进”，法国哲学家，古生物家，主张进化论。——译者

或怀特海*。

爱因斯坦在1905年发表的狭义相对论的最令人吃惊的结果之一，就是引入了一个与每个观察者相联的地方时。但是，这个地方时依然是可逆的时间。无论是在狭义相对论中，还是在广义相对论中，爱因斯坦的问题主要是观察者之间的“通信”问题，是这些观察者能够比较时间间隔的方法。然而现在我们能够在另一些概念的来龙去脉中去研究时间了。

在经典力学中，时间是一个数，标志着一个点在其轨道上的位置。但是在某个全局性的层次上，时间可能还有另一种不同的意义。当我们看一个小孩并猜测他或她的年龄时，这个年龄并不存在于这小孩身体的任何一个特殊部位上。这是一种全局性的判断。人们常常说科学把时间空间化了。但我们现在发现，另一种观点也是可能的。考虑一处风景及其变化：村庄在发展，桥和路联接了不同的区域，并使它们得到改造。这样，空间得到了一个时间维，按照地理学家贝里(B.Berry)的说法，我们已被引导去研究“空间的计时”了。

不过，最重要的进步也许就是，我们现在可以从另一种不同的角度来看结构的问题，有序的问题。我们将在第八章中说明，按照动力学的观点(无论是经典动力学的还是量子力学的观点)，不可能有任何一种由时间指向的进化。由于“信息”可以用动力学的术语来定义，信息在时间中仍是不变的。这听起来是悖理的。当我们混合两种液体的时候，并没有发生任何“演变”，尽管事实上我们不可能不用某种外来的手段而取消这混合的结果。相反，熵定律把这个混合描述成是向“无序”的演变，向最大概率状态的演变。现在我们可以证明，这两种描述并不矛盾，但

---

* 怀特海(Whitehead, 1861—1947)，英国数学家，哲学家。——译者

是说到信息或有序，我们必须重新定义我们所考虑的单元。重要的新事实是，我们现在可以建立从一种形式的单元到另一种形式的单元的精确规则。换句话说，我们已经得出第二定律所表达的进化范式的一种微观表述。由于这种进化范式包括了化学的全部和生物学及社会科学的主要部分，在我们看来，这是一个重要的结论。这种深刻的认识是在晚近得到的。在物理学中发生的重新概念化的过程还远远没有完成。但是我们的意图并不是要把科学的确定收获，它的稳定的和完全确立的成果弄个明白。我们想做的是强调科学活动的概念创造能力，以及它所带来的新前景和新问题。无论如何，我们现在懂得，我们不过刚刚开始这种探索。我们不应该认为疑问或危险即将结束。因此，我们决定使事物像我们现在所看到的样子呈现出来，并且完全知道我们的答案是多么不完善。

5

欧文·薛定谔有一次写了下面这段话，惹起了许多科学哲学家的愤怒：

……有一种倾向，忘记了整个科学是与总的人类文化紧密相联的，忘记了科学发现，哪怕那些在当时是最先进的、深奥的和难于掌握的发现，离开了它们在文化中的前因后果也都是毫无意义的。如果有一种理论科学，它不懂得它的结构中那些被认为是要害的部分，最终不免要被纳入一些概念和词语(它们抓住了有教养的团体)的框架之中并成为一般世界图式的一部分——我认为，如果有一种理论科学，在那里，这一点已被忘记，在那里，已经对它入了门的人用那些

最多只被少数游客所懂得的术语互相继续着冥想，那么，这种理论科学必将被其他有教养的人所抛弃。尽管深奥难懂的闲谈可能会在那些乐于孤立的专家群内部继续着，但随着时间的流逝，它注定要萎缩和僵化。

本书的基本论题之一就是下述两者之间的强相互作用：整个文化所固有的问题和个别科学内部的概念问题。正是在科学的心脏之处，我们发现了关于时间的问题。演化和不可逆性，这也是几代哲学家为之付出了毕生精力的问题。今天，当历史(无论是经济的、人口学的或是政治的历史)正以前所未有的速度前进时，新问题和新兴趣要求我们进行新的对话，寻找新的一致性。

但是我们知道，科学的进步经常被人们用分裂的术语描述成一种从具体经验到越来越难掌握的抽象阶段的变换。我们相信，在认识论上，这种解释只是历史情况的反映(经典科学在这种历史情况中找到了自己)，是经典科学无法把人与环境相互关系的广泛领域包括到它的理论框架中去的结果。

毫无疑问，存在着科学理论的抽象发展。但是对于科学发展来说有决定意义的概念革新并不一定属于这种类型。时间的再发现既有科学内部历史的根源，又有社会关系中的根源，今天，科学正是在这个社会关系中找到了自己。诸如不稳定基本粒子的发现或宇宙膨胀的发现，都清楚地属于科学内部的历史。但在非平衡的情形中，在进化的系统中，一般的兴趣可能反映出我们感觉到整个人文学科今天正处于一个变迁的时期。我们将要在第五章和第六章中报告的许多结果，例如有关振荡的化学反应的结果，有可能在许多年前就被发现，但是对这些非平衡态问题的研究工作在当时的文化和意识形态的环境中被压抑了。

我们知道，肯定这种对文化内容的敏感，就违背了科学的传统概念。按照这种观点,科学是通过把自己从认识自然的过时形式中解放出来而得到发展的。它在一种可以比作是理性"苦修"的过程中纯洁了它自己。但这一点又引出了如下结论:科学应当只由那些独立生活、不问世事的团体去实践。按照这个观点,理想的科学团体应当得到免于社会压力和需求的保护。科学进步应当主要是自治的过程,任何"外部"的影响,比如科学家参与其他的文化、社会或经济活动,将仅仅起干扰或延迟的作用。

这种抽象的理想,科学家退隐的理想,在另一个理想中找到了同盟者,这个理想关心的是一个"真正"研究者的天职,就是说他要从世俗变迁中逃脱出去的愿望。爱因斯坦描写过这样一类科学家,假如"上帝的天使"被赋予把一切"无价值"的人——没有说是在哪一方面——从"科学庙堂"中逐出的任务,那么这类科学家将会得到天使的青睐。一般说来,他们是

> ……相当怪癖、沉默寡言和孤独的人，尽管有这些共同特点，实际上他们彼此之间很不一样，不像被赶走的那许多人那样彼此相似。
>
> 究竟是什么把他们引到这座庙堂里来的呢?……把人们引向艺术和科学的最强烈的动机之一，是要逃避日常生活中令人厌恶的粗俗的和使人绝望的沉闷，是要摆脱人们自己反复无常的欲望的桎梏。一个修养有素的人总是渴望逃避个人生活而进入客观知觉和思维的世界；这种愿望好比城市里的人渴望逃避喧嚣拥挤的环境，而到高山上去享受幽静的生活，在那里，透过清寂而纯洁的空气，可以自由地眺望，陶

醉于那似乎是为永恒而设计的宁静景色。

除了这种消极的动机以外，还有一种积极的动机。人们总想以最适当的方式来画出一幅简化的和易领悟的世界图像，于是他就试图用他的这种世界体系来代替经验的世界，并来征服它。

一方面是科学所寻求的禁欲主义的美，另一方面是被爱因斯坦如此敏锐地感觉到的市俗经验的小旋涡，这两者之间的不相容性，容易被另一种不相容性增强。这另一种不相容性是公然的摩尼教式的不相容性，是科学与社会之间，更确切地说，是自由的人类创造力与政治权力之间的不相容性。在这种情况下，研究工作不必在孤立的团体中或在庙堂中进行，而是在一个堡垒中，或者还可以像德林迈特(Düe rrenmatt)在他的剧作《物理学家》(*The Physicists*)里所想象的，在疯人院里进行。在这个剧中，三位物理学家讨论要用怎样的方法和手段推进物理学的发展，同时又能保护人类避免政治权力盗用物理学的进步成果所造成的可怕的后果。他们得出结论：惟一可能的方法就是他们当中的一个人已经选择的方法。他们全都决定装疯，躲到疯人院里去。该剧结尾时，如命中注定的那样，他们的最后避难所被发现只是一个幻想。疯人院的女院长暗中侦查了她的病人，偷窃了他的研究成果，夺得了世界政权。

德林迈特的剧作把我们引到科学活动的第三概念：科学通过把现实的复杂性约化为一种隐藏的简单性而得到进步。物理学家摩比尤斯(Moebius，剧中的人物)试图在疯人院中隐藏的是这样的事实，即他已经成功地解决了引力的问题，解决了基本粒子的统一场论，以及最后得出了“万能发明原理”——绝对权力的源泉。当然，德林迈特为建立他的观点进行了简化，但得到公认的是：在“科学庙堂”中被寻找的东西正是宇

宙的“公式”。曾经被描绘成禁欲主义者的科学家,现在变成了一个魔术师,一个与世隔绝的人,揭露一切物理现象的万能钥匙的潜在掌握者,因此,他具有潜在的万能的知识。这把我们带回到我们已经提出过的问题:只有在简单的世界中(特别是经典科学的世界中,在那里,复杂性仅仅是基本的简单性的面纱而已),某种能提供万能钥匙的知识才会存在。

我们时代的问题之一就是克服那种认为科学团体的孤立状态是正常的并要加强这种状态的倾向。我们必须为科学与社会的沟通打开新渠道。本书正是在这样的思想指导下写成的。我们都知道,人类正在以前所未有的规模改造着他的自然环境。正如塞奇·莫斯科维奇(Serge Moscovici)指出的,人类在创造一个“新的自然”。但是,为了理解这个人造的世界,我们需要一种科学,它不仅是顺从外部兴趣的工具,也不是任其在底层社会滋长的癌瘤。

早在两千年前,庄子就写道:

> 天其运乎!地其处乎!日月其争于所乎?孰主张是?孰维纲是?孰居无事推而行是?意者其有机缄而不得已邪?意者其运转而不能自止邪?

我们相信,我们正朝着一种新的综合前进,朝着一种新的自然主义前进。也许我们最终能够把西方的传统(带着它对实验和定量表述的强调)与中国的传统(带着它那自发的、自组织的世界观)结合起来。在本导论的开始,我们引述了雅克·莫诺的话,他的结论是:“古老的盟约撕成了碎片,人类至少知道他在宇宙的冷冰冰的无限空间中是孤独的,他的出现是偶然的。”也许莫诺是对的。古代的同盟已被打碎。我们的任务不是去悲叹过去,而是要试图在这科学的极不平凡的多样性中发现某种

统一的线索。科学的每个伟大时期，都引出某个自然界的模型。对经典科学来说，这个模型是钟表。对十九世纪的科学，即工业革命时代来说，这个模型是一个逐渐慢下来的发动机。对于我们来说，标志可能是什么呢？我们头脑里的东西也许可以用那些从古印度或前哥伦布的艺术直到我们时代为止的雕刻最好地表达出来。在一些最美的雕像中[无论是在舞蹈的湿婆(Shiva)中或是盖来罗(Guerrero)的小型庙堂中]，十分清晰地表现出一种寻求，寻求静止与运动之间、捕捉到的时间与流逝的时间之间的接合。我们相信，这个对照将把它的独一无二的特点赋予我们的时代。

第一编

宇宙的幻象

第一章　理性的胜利

1　新的摩西

自然和自然的法则在黑夜中隐藏；
上帝说，让牛顿去吧！
于是一切都已照亮。

——亚历山大·蒲柏
为牛顿写的墓志铭
(牛顿故于 1727 年)

蒲柏使用这种富有戏剧色彩的笔调是毫无奇怪之处的。在十八世纪英格兰人的眼里，牛顿就是受过所谓“律条”指点的“新的摩西”。诗人、建筑师、雕刻家们协力塑造纪念碑，整个民族在一起集会，庆祝这个无与伦比的大事：一个人发现了自然所说的和所遵守的语言。

自然不得不屈从于他的聪敏才学，
愉快地向他交出她的全部秘诀；
她对数学不曾设防，
因而只得向实验结果投降。

伦理学和政治学把牛顿事件作为它们论据的基础。于是德萨古利耶(Desaguliers)把新自然秩序的含义移进了政治教本：君主立宪制乃是最好的政体，因为国王，像太阳一样，其权力受到它的限制：

像大臣们注视着他的眼色，
六部围着他的王位神秘起舞，
他从他弯曲的路线上使他们运动，
借助于吸引力使他们的轨道屈从，
他那受法律约束但仍使他们自由的权力
指导着而不是破坏着他们的自由。

牛顿自己虽然没有侵入精神科学的范畴，但他对于他在《原理》中所建立的法则的普适性却没有任何犹豫。他在他的《光学》一书中著名的第三十一个问题里断言，自然是"非常和谐自适的"——而且这个有力而简洁的语言包藏着很广泛的主张：燃烧、发酵、热、粘结、磁等等，没有哪一个自然过程不是由这些能动的力——吸引力和排斥力——所产生的，这些力不仅控制着星体的运动，而且控制着自由落体的运动。

牛顿在他还活着时就已是一位民族英雄，而在将近一个世纪之后，主要是通过拉普拉斯的强大影响，他成了欧洲科学革命的象征。天文学家巡视数学所统治的太空。牛顿系统成功地克服了一切障碍。更有甚

者，它打开了通向数学方法的道路，由于这种数学方法，表面的偏差能够得到解释，甚至能用来推测出存在着当时尚未知道的行星。在这种意义上说，对海王星的预言乃是牛顿的远见卓识中内在的预言力的贡献。

十九世纪初，牛顿的名字几乎成为一切作为范例的事物的象征，但是对他的方法却有着几种互相矛盾的解释。一些人认为它为可用数学表述的定量实验提供了一个蓝图，对于这些人，化学找到了它自己的牛顿——拉瓦锡。他开创了对天平的系统使用，这对于在验证质量守恒的基础上建立定量化学来说真是决定性的一步。而在其他人看来，牛顿的战略在于隔离某个主要的特殊事实并利用它作为对给定的一组现象作进一步推演的基础。从这个看法上说，牛顿的天才在于他的实用主义方法。他并不企图解释引力，而是把它作为一个事实。同样，每个学科也应把某些主要的未经解释的事实作为出发点。这样，医生们感到他们受到牛顿的许可去修补活力论的概念，谈论独特的“生命力”，利用这个生命力可以使生命现象的描述得到一种被期待的系统的一致性。这与被当作一种特殊的化学相互作用力的亲和力扮演的是同一个角色。

一些“真正的牛顿派”对这个力的扩散提出抗议并且重新确定了引力的解释能力的普适性。但是已为时过晚。现在**牛顿的**这一术语被用于研究定律体系、研究平衡现象的每一事物，甚至被用于一方面由自然秩序，另一方面由道德、社会和政治秩序包罗一切的谐和性去表达的所有场合。浪漫的哲学家甚至在牛顿的宇宙中发现了被自然力所激励的迷惘的世界。更多的“正统”物理学家从中看到被数学所统治的力学世界。对于实证主义者，这意味着一个步骤的成功，一个被视为与科学的真正定义等同的秘诀的成功。

余下来的是文学——经常被叫做牛顿的文学；支配着星球社会的

谐和性，给出化合物的“社会生活”的有选择的亲和性和敌对性，这些可以作为向人类社会过渡的过程而出现。毫不奇怪，这个时期是经典科学的黄金时代。

今天，牛顿科学仍然占有独一无二的地位。它所引进的一些基本概念代表了从所有科学变革中幸存下来的最后成果。但是我们知道，经典科学的黄金时代已经过去了，而且这样一种思想也随之一去不复返了：这种思想认为虽然对牛顿的推理有着各种互相矛盾的解释，但这个推理方法组成了我们和自然对话的一个合适的基础。

本书的一个中心主题就是牛顿的胜利，就是直到今天不断扩充着牛顿思想的新研究领域的继续开创。本书也要讨论从这个胜利中产生的怀疑和斗争。今天我们开始更清楚地看到牛顿推理的局限性。科学和自然的更一致的概念看来正在出现。这个新概念正在为知识和文化的新的统一铺平道路。

2　一个失去人性的世界

……愿上帝保佑我们

离开单一的梦幻和牛顿的长眠！

——威廉·布莱克

1802 年 11 月 22 日写给托马斯·巴茨的信

要解释牛顿科学在文化中的地位的不稳定性，最好是引述联合国教科文组织关于科学与文化的关系的报告。该报告写道：

一个多世纪以来，科学活动的部分在其周围的文化空间内已增长到如此的程度，以致它好像正在代替整个文化

> 本身。某些人相信，这只是由于其高速发展而形成的幻影，这个文化的力线将很快重新申明自己并把科学带回到为人类服务中去。另一些人考虑，科学最近的胜利最终要给予它统治整个文化的资格，而且文化之所以能继续被大家知道，仅仅因为它是通过科学装置来传播的。还有一些人，被只要人和社会在科学的支配之下就会受到操纵的危险所吓倒，他们觉察到在远处隐隐出现的文化灾难的幽灵。

这样说来，科学像是文化体内的癌瘤，它的增殖威胁着要破坏整个文化的生命。问题在于我们能否统治科学和控制其发展，或者说，我们是否将被其奴役。在仅仅一百五十年间，科学已经从鼓舞西方文化的源泉降为一种威胁。它不仅威胁人的物质存在，而且更狡猾地，它还威胁着要破坏深深地扎根于我们的文化生活中的传统和经验。受到控告的不是某种科学突破在技术上的附带成果，而是“科学精神”自身。

无论这个控告所指的是科学的文化所渗出的全盘怀疑论，还是通过科学理论所得到的特殊结论，今天人们常常断言：科学正在使我们的世界降格。几代以来愉快和惊奇的源泉在它的一触之下而干涸，它所触及的一切都失去了人性。

十分奇怪，科学进步所带来的决定命运的解除迷惘的思想不仅是科学的批评家们所具有的思想，而且是经常保护或推崇科学的人所具有的思想。因此，历史学家吉利斯皮(C.C.Gillispie)在其《客观性的锋芒》(*The Edge of Objectivity*)一书中表达了对许多批评科学和不懈地致力于把“客观性的锋芒”弄钝的人的同情：

> 的确，研究自然的主观方法的复活构成了一个悲惨的主

> 题，它的废墟像良好的意图一样在科学所走过的土地上遍布着，仅仅在如李森科学说和人性学*的陌生角落中幸存，在那里自然是被社会化和道德化了的。这些幸存者是不断企图摆脱西方人最有特色和最成功的运动的影响的一些遗物，而这个运动注定要挫败幸存者的企图。因此，正像对着必然之物的任何攻击一样，浪漫的自然哲学已经导致从自暴自弃到英雄主义的情绪上的每一个细微差别。从最丑恶的方面说，它是对于智能的感情上的或粗俗的敌对。从最高尚的方面说，它鼓舞了狄德罗的自然主义的和道德化的科学，歌德的自然人格化，华兹华斯的诗篇，以及艾尔弗雷德·诺思·怀特海的哲学，或者任何其他人的哲学，他们要在科学中为我们对于自然的定性的和审美的鉴赏寻找一个位置。它是这些人的科学，他们要构成开花的植物学和日落的气象学。

因此，科学导致悲剧的形而上学的选择。"人"不得不在两件事上作出选择：一件是使人放心的但是非理性的诱惑，以便在自然中寻找人类价值的保证，寻找表明基本相互关系的某些迹象。另一件是对理性的保证，即把人类从寂静的世界中孤立出来。

另一个主题(统治)的回声混合着解除迷惘的回声。同时，解除迷惘的世界是一个倾向于控制和操纵的世界。任何科学都把世界想象为按照一个把其各种财富归结为一般定律的简单应用的普适的理论计划被统治着，借此把它自己当作是统治的工具。而人类，这个世界的陌生者，把自己当作它的主人。

---

* 人性学：原文为 anthroposophy，奥地利哲学家斯坦因诺提出的一种起源于神性学的精神神秘的学说。——译者

最近几十年中，这个迷惘的解除采取了各种形式。系统地研究各种反科学的形式超出了本书的目的。在第三章中我们将更详细地讨论西方思想对牛顿理性的惊人胜利的反动。这里让我们仅注意，现在有了一个关于自然的流行态度上的深刻变化以及对于存在着科学和“自然主义”之间的深刻对立的普遍信念，虽然我们认为这种信念是错误的。为了说明最近几年中至少出现了几种反科学批判主义的形式，我们选择了三个有意义的例子。我们从海德格尔开始，他的哲学对当代思想有很深的影响。我们也将提及阿瑟·凯斯特勒*和伟大的科学史家亚历山大·柯伊莱提出的批评。

马丁·海德格尔(Martin Heidegger)所批判的正是科学所致力的核心，他把这个核心看做基本上和永恒的目标即统治自然有关。因此海德格尔主张，科学理性乃是自从古希腊开始就已隐隐呈现的某种东西的最终成就，这就是，在一切理性讨论或艰辛工作中起作用的统治意志，潜伏在一切实证的和可传授的知识中的狂热。海德格尔强调了他的所谓技术框架与科学框架，这个框架导致世界以及人类的总的安排。

这样，海德格尔没有详细分析任何特殊的技术或科学的成果或过程。他对之挑战的是技术的本质，是考虑每一件事的方法。每个理论都是组成西方历史的主计划的实施的一部分。根据海德格尔的思想，我们称之为某科学“理论”的东西乃是一种研究问题的方法，按照这种方法，事物被归结为受控制。和技术家一样，科学家是装扮成渴求知识的统治意志手中的玩物。科学家研究事物的方法使这些事物遭受系统的伤害。

近代物理学不是实验的物理学，因为它使用实验设备去

---

* 凯斯特勒(Arthur Koestler，1905—　)，匈牙利出生的作家，评论家。——译者

研究自然。宁可倒过来说才是对的。因为物理学已经作为纯理论，要求自然用可以预言的力去表现自己，物理学建立实验的惟一目的正是为了问一问自然是否遵从以及怎样遵从科学事先想象的模式。

同样，海德格尔不关心这样的事实，例如工业污染毁灭了莱茵河中的一切动物的生命。他所关心的是该河为人类作出的服务。

水电厂建造在莱茵河中。水电厂使莱茵河提供水压，而这水压又能推动涡轮……水电厂并不像几百年来连接两岸的古老木桥那样建立在莱茵河之中，相反，该河被拦河坝拦进电厂。现在的河流即水的提供者，是从电站的本质来讲的。

跨在莱茵河上的古桥之所以有价值并不是作为久经考验的能力和周密精确的观察的一个证据，而是因为它不曾“使用”该河。

海德格尔的批评把实证的可传授的知识的理想当作威胁，反映了我们已在导论中提到的反科学运动的某些主题。但是在科学与统治意志间有某种不可分隔的联系的思想也渗透进了对我们现今的状态的一些表面上看来很不相同的评价之中。例如，在相当有启发性的题目“黄金时代的到来”之下，冈瑟·斯坦特(Gunther Stent)说道，科学现在正接近它的极限。我们正越来越接近那递减的终点，在那里，我们为了掌握事物而针对这些事物所提出的问题变得越来越复杂和缺少趣味。这标志着进步的完结，但对人类来说，这是个机会去停止其疯狂的努力，结束那对自然的古老斗争，接受静止和舒适的和平。我们想证明，对于某个客体的科学知识与掌握它的可能性之间的相对分离远远没有使科学

终结，而是为大量新的前景和新的问题发出信号。对于我们周围世界的科学的认识才刚刚开始。但是，还有另一种科学的概念，潜在地说，我们觉得这种概念恰恰是有害的。这就是伴有迷人色彩的神秘科学，它通过普通凡人难于接近的推理，引出了这样的结果：可能一下子向诸如时间、空间、因果性、精神或物质等等基本概念的意义提出挑战。这种“神秘科学”(其结果被想象为能打碎任何传统概念的框架)，实际上受到了相对论和量子力学连续“揭露”的鼓舞。无疑，过去已迈出了最有想象力的几步。例如，爱因斯坦把引力解释为空间的曲率，或狄拉克的反粒子，它们已经动摇了某些看来已经很好地建立起来的概念。因此，在容易想象科学能够产生出什么来以及一种彻底的现实主义之间，有一个非常微妙的平衡。今天，不管是在出版物中还是在科学本身之中，尤其是在宇宙学家中间，这种平衡正有力地移向神秘主义的复兴。有些物理学家和科学普及工作者甚至猜测，在超心理学与量子物理学之间存在着神秘的关系。让我们引述凯斯特勒的话：

> 我们已经听到诺贝尔物理学奖金获得者的全部合唱，告诉我们物质死去了，因果性死去了，决定论死去了。如果真是如此，就让我们伴着电子音乐的挽歌体面地埋葬它们。现在是我们从二十世纪的后机械论科学中吸取教训和摆脱十九世纪唯物论加在我们哲学观点上的束缚的时候了。佯谬地说，假如那种观点保持与近代科学本身并列的话，我们就不会落后一个世纪而是早就从那个束缚下解放出来了。……但是，一旦承认了这一点，我们就可能变得更加善于感受我们周围的现象(过去由于片面地强调物理学，使我们对这些现象毫无所知)；我们就可能感到通过理性大厦

的裂缝而吹出来的风；我们就会更加注意会合的事件；就会把那些超正规的现象纳入我们的正规观念之中；而且会认识到，我们一直生活在“盲人国”之中。

我们不想先验地进行判决或谴责。在我们今天听说的某些表面上看来是异想天开的论题中，可能有着某些新知识的种子。尽管如此，我们相信跳入那不可想象的客体里就是极其简单地从我们世界的复杂性中逃脱出去。我们不相信我们会在一天之内离开“盲人国”，因为概念上的盲目并非我们的社会所无法解决的问题和矛盾的主要原因。

但是，我们不同意某些对科学的批评或歪曲，并不意味着我们想拒绝所有的批评。让我们站在例如亚历山大·柯伊莱的地位上，他曾对近代科学发展的认识方面作出了杰出的贡献。柯伊莱在其对牛顿综合的意义和蕴含的研究中写道：

但是这里还有一些东西，对于它们，牛顿——或者说得更好一些，不是牛顿一个人，而是一般的近代科学——仍能承担责任：即把我们的世界一分为二。我一直认为，近代科学打破了隔绝天与地的屏障，并且联合和统一了宇宙。而且这是对的。但正如我说过的，它这样做的方法，是把我们的质的和感知的世界，我们在里面生活着、爱着和死着的世界，代之以另一个量的世界，具体化了的几何世界，虽然有每一事物的位置但却没有人的位置的世界。于是科学的世界——现实世界——变得陌生了，并且与生命的世界完全分离，而这生命的世界是科学所无法解释的，

甚至把它叫做“主观的”世界也不能解释。

的确，这些世界每天都在(甚至越来越)被实践所连接。对于理论，它们还被一个深渊所分划。

两个世界：这意味着两个真理，或者根本没有真理。

这就是现代思想的悲剧，它“解决了宇宙之谜”，但仅是用另一个谜，它自身的谜来代替。

但是，我们在柯伊莱的结论中听到了帕斯卡和莫诺所表达的同样的主题——这个使人陌生的悲剧感觉。柯伊莱的批评并没有向科学思想挑战，而是向基于牛顿观点上的经典科学挑战。我们不再苦于先前的困境，在把人类归结为清醒世界的陌生之客的科学与反科学的不合理的抗议之间进行选择。柯伊莱的批评不需要乞灵于某种束缚性的理性的限制，而仅仅求助于经典科学在处理我们所生活的这个世界的某些基本方面时的无能为力。

我们在本书中所取的态度是，柯伊莱所描述的科学不再是我们的科学，而且不是因为我们今天关心着新的不可想象的客体，比起普通逻辑来更加接近魔术的客体，而是因为作为科学家的我们，现在开始找到了通向复杂过程的路，这些复杂过程组成了我们十分熟悉的世界，生物及其社会在那里相伴发展的自然世界。今天，我们真的开始越出柯伊莱所说的“量”的世界而进入“质”的世界，因而也就是“演化”的世界。这将是本书前两编的主要论题。我们相信，正是这个转向新描述的过渡使得科学史上的这一时刻如此令人兴奋。也许这样说不算是夸大：这乃是同诞生新自然观的希腊原子论者的时代或文艺复兴时代一样的时期。

但是让我们首先回到牛顿科学上来，它当然是人类史上伟大的时

刻之一。

3 牛顿的综合

在牛顿同代人的热情后面，在他们关于宇宙的秘密、自然的真理终将被揭露出来的信念后面，隐藏着什么东西呢？大约从人文科学的开创时起就呈现出来的几条思想线索汇合到牛顿的综合之中：首先，科学是作用于我们周围环境的一种方法。牛顿科学确实是能动的科学；它的源泉之一是中世纪工匠的知识，是机器制造者的知识。因此，这个科学提供了一些手段去系统地作用于世界，预言和修改自然的进程，想象各种装置去驾驭和利用自然的力和物质资源。

在这种意义上，近代科学乃是人类组织并开发其所生活的世界的长期努力的继续。我们还缺乏关于这一努力的早期阶段的知识，但是通过追溯，可能估计出新石器时代的革命发生所需的知识和技巧。那时人类逐渐开始组织其自然的和社会的环境，用新技术去开发自然和组织其社会。我们现在仍然，或者说直到最近，一直在使用着新石器时代的技术，例如饲养出的或经过选择的动植物物种，纺织，陶器，金属加工等。我们的社会组织长期以来就是建立在与组织新石器时代的城市国家中不同阶层和结构的社会团体所需要的同一技术基础之上：书写、几何和算术。因此我们不得不承认，新石器时代的技术与科学革命和工业革命之间存在着连续性。

因此，近代科学扩展了这一古老的努力，把它放大并不断加快其节律。然而，这并没有减损牛顿综合所赋予科学的意义。

除了在给定社会中所使用的各种技术之外，我们还发现每个社会都有一定数目的信仰和神话，这些信仰和神话要用来解释人类在自然中的地位。与神话和宇宙学一样，科学所致力的是理解世界的本性、世

界的组织方法和人类在其中的位置。

前苏格拉底派的早期推测好像是从赫西俄德的创世神话中改编成的:这就是,天地的初始分极,爱神厄洛斯唤起的欲望,第一代神明的诞生形成不同的宇宙权力、战争和敌对,交替着残暴和血仇,直到终于在正义的统治下达到安定。从我们的观点出发,这本是风马牛不相及的。问题在于:前苏格拉底派所收集、讨论和批评的某些概念,我们在几代的时间里仍然试图加以组织,以便理解存在与演化(或者说在假定没有差别的初始环境中出现有序)之间的关系。

均匀的不稳定来自何处呢? 为什么均匀会自发地产生差别呢?为什么事物总会存在呢?它们是在彼此冲突的自然权力间的力的静态平衡中出现的不公正即不平衡的某个脆弱和注定要死亡的结果吗?或者说,创造和驱动事物的力是自发地存在着——爱和恨的竞争导致出生、成长、衰老和消散吗?变化是幻影呢,还是正好相反,是在组成事物的对立面之间不停息的斗争呢?能够把质的变化归结为仅在形式上互相区别的原子在真空中的运动呢,还是原子本身是由许多性质上各不相同的细菌组成的呢?最后,世界的谐和是数学上的吗?数字是自然的钥匙吗?

毕达哥拉斯派所发现的声音间的数字规律仍然是我们现今音乐理论的一部分。希腊人得出的数学模式组成了欧洲史上第一个严密的抽象思维体系,其结果对于一切能思考的人类来说是可以传授的和可以再生的。古希腊人最早得出了某种形式的演绎知识,包含了一定程度的确定性,这个确定性不受人们的信仰、期望或感情的影响。

与宗教形式和神化形式的询问相反,古希腊思想与近代科学所共有的最重要的方面就是强调批判的讨论和证实。

关于在爱奥尼亚的一些城市和大希腊 * (Magna Graecia)的殖民地中生长起来的这个前苏格拉底派哲学,人们所知甚少。于是谈到在理论的和宇宙学的假说的发展与这些城市的兴旺的工艺技术活动之间可能存在的关系时,我们只能进行推测。传统指出,由于宗教的敌对和社会的反动,哲学家们被控告为无神论者而且被驱逐或处死。这个早期的"恢复秩序"可当作是在对概念更新的起源尤其是其生长的解释中社会因素有多么重要的一个标志。为了理解近代科学的成功,我们还必须解释为什么科学的奠基者们一般说来没有过分地受到迫害,他们的理论方法没有过分地受到抑制而让位给与公众的期望和信念更加协调一致的知识形式。

尽管如此,从柏拉图和亚里士多德以来,限制被建立起来,思想沿着可为社会接受的方向发展。特别是,建立了理论思维和技术活动之间的区分。一些我们今天还在使用的词——机器、机械、工程师——都具有相类似的含义。它们指的不是理性知识,而是诡计和权术;这里提出的思想不在于为了更有效地利用自然过程而去学会它们,而在于欺骗自然,"策划"反对自然——即创造奇迹,创造与事物的"自然秩序"无关的效应。于是对自然的实际应用领域和对自然的理性认识领域被截然分开。阿基米得的地位仅仅只是一个工程师的地位;他对机器平衡的数学分析至少在传统物理学的框架中并没有被认为可以应用于自然界。相反,牛顿的综合是表达应用与理论认识之间的系统同盟的。

还可以在牛顿革命中找到其表达的第三个重要因素。在静止的恒星和行星的世界与我们周围朝生暮死混乱缤纷的世界之间有着十分惊人的对比,这大概我们每个人都经历过。正如米尔恰·伊利亚德(Mircea

---

* 大希腊,历史地名,包括希腊及其周围地区。——译者

Eliade) 所强调的，在许多古代文明中存在着渎神空间和神明空间的分野。这个分野对应着把世界划分为一个通常的空间即服从于机遇和堕落的空间，以及另一个有意义的与偶然性和历史无关的神明空间。这就是亚里士多德所建立的恒星世界与我们月下世界之间的对比。这个对比对于亚里士多德用来估价对自然进行定量描述的可能性的方式来说是决定性的。因为天体的运动不是变化而是一个永远同一的"神明"状态，所以它可以用数学的理想化来描述。但是，数学的精确和严格与月下的世界无关。不精确的自然过程只能服从于某种近似的描述。

无论如何，对于亚里士多德派来说，知道一个过程为什么会发生比描述它如何发生更加令人感兴趣，或者宁可说，这两个方面是不可分割的。亚里士多德的思想的主要源泉之一在于观察胚胎的发育，一个高度有组织的过程，其中互锁的事件虽然在表面上是无关的，但却都参加到像是组成全局性计划的一部分的过程中去。像发育中的胚胎那样，整个亚里士多德的自然是按照最终原因组织的。一切变化的目的，只要与事物的本性一致，就是要在每一存在中实现其可理解的本质的完善。这个本质在生物的情况下同时是它们最终的、形式上的和有效的原因，因而这个本质乃是理解自然的关键。在这个意义上，"近代科学的诞生"，亚里士多德派与伽利略之间的冲突，乃是两种理性之间的冲突。

在伽利略看来，对于亚里士多德派来说是如此宝贵的"为什么"的问题是向自然讲话的一种非常危险的方式，至少对科学家来说是这样。而另一方面，亚里士多德派却把伽利略的态度看作是一种无理的盲信。

因此，伴随着牛顿体系的到来，一个新的普适性胜利了，它的出现能统一那些直到当时还分划着的东西。

4 实验的对话

我们已经强调了描述近代科学的一个基本因素:实践和理论之间的结缘,改造世界的欲望和认识世界的欲望之间的联合。为了使这成为可能,不管经验主义者的信条怎样,仅仅注重观察到的事实是不够的。在某些方面,甚至包括对机械运动的描述,亚里士多德的物理学实际上被更为便利地带进了与经验事实的接触之中。近代科学所发现的人与自然的实验对话涉及到活动而不是被动的观察。必须要做的事情是,操纵物理的现实,让这个现实这样地“登台”,以便使它尽可能严密地与理论描述相一致。所研究的现象必须被准备好并且被孤立出来,直到它接近某种在物理上达不到的但与所采用的概念模式相一致的理想状况。

作为一个例子,让我们看一下对滑轮系统的描述。这个系统是一个自阿基米得时代起就被研究过的经典系统,阿基米得的推理已被近代科学家加以推广,以适用于一切简单机械。令人惊异的是,近代的解释已经以毫不相干为理由消除了亚里士多德物理学所解释的那个东西,这就是这样的事实:按照典型的想象,一块石头“抵抗”一匹马要拉动它的力,而这种抵抗可以用通过某个滑轮系统施加牵引力的方法来“克服”。而按照伽利略的看法,大自然从来不肯放弃任何东西,从不无缘无故地做任何事情,而且从来不会上当中计;设想凭借技巧或谋略能使大自然作出任何额外的功来是荒唐的。因为,无论有滑轮还是没有滑轮,马所能够做的功是相同的,所以一定会产生同样的效果。于是,这就变成了机械论解释的出发点,这种解释因而是针对一个理想的世界而言的。在这个理想世界中,“新”的效果,即石头终于被拉动,只具有第二等的重要性,而且石头的阻力只由摩擦和生热来定性地描述。另一方面,

被精确描述的是这样一种理想情况，其中等效关系把原因(即马所做的功)和效果(即石头的运动)联系起来。在这个理想世界中，无论如何，马能够移动石头，而滑轮系统的效果只是改变拉力传递的方式；马并不是把石头移动一段等于它拉着绳索所通过的距离 L，而仅仅是把石头拉动 L/n 的距离，其中 n 与滑轮的数目有关。像一切简单机械一样，这些滑轮组成了一个被动的装置，它只能传递运动而不会产生运动。

因此，实验对话相当于一种高度特殊的过程。大自然在某些先验原理的名义下，像在法庭上那样受到实验的盘查。自然所作的回答被最精确地记录下来，但这些回答之间的关联正是用指导该实验的理想化来评价。所有其他的东西都不是信息，而是瞎扯，是可以忽略的次级效应。自然很有可能拒绝问题中的理论假设。不过，后者仍被用作一个标准，借以去量度响应的蕴含和意义，而不管这种响应可能是什么。海德格尔在其反对科学理性的论据中所提到的正是这种向自然提问的命令般的方式。

在我们看来，实验方法确实是一种艺术，就是说，它建立在特殊技能而不是一般规则的基础上。历来不曾有过任何人能担保实验的成功，人们总是受到浅薄或拙劣的判断力的摆布。没有任何方法论的原则能消除比方说钻进研究问题的死胡同的危险。实验方法是选择一种有趣问题的艺术，是考察由此而成立的理论框架的一切后果的艺术，是考察自然能否以所选择的理论语言来作出一切可能答案的艺术。在自然现象的具体复杂性中，必须选择一种现象，认为它最能以明确的方式体现这种理论的含义。然后把这个现象从周围环境中抽象出来并“搬上舞台”，使理论能以可传授的和可再生的形式受到检验。

尽管这个实验的过程从一开始就受到批判，受到经验主义者的冷遇，并且受到另一些人的攻击(因为它是一种痛苦的折磨，一种把大自然

放到刑具台上去的方法)，但它仍经过科学描述的理论内容的一切修正而得以生存下来，并终于确定出被近代科学引入的新研究方法。

实验过程甚至可以成为纯理论分析的一种工具。于是，所谓“假想实验”(即对完全服从于某些理论原则的实验情况作出想象)使得这些理论原则在某个给定场合的结果得到研究。这样的假想实验在伽利略的工作中起过关键性的作用；而且在今天，它们处在有关现代物理学的概念变动——也就是关于相对论和量子力学的后果的研究——的中心。最有名的这种假想实验之一就是爱因斯坦的著名的火车，从这个火车实验中，观察者可以测量沿着路堤发射的一束光线的传播速度，这光线在某参照系中以速度 c 运动，而火车相对于该参照系以速度 v 运动。按照经典的推理，火车上的观察者应当认为沿着和他同方向传播的光的速度为 $c-v$，但是这个经典的结论恰好代表了荒谬，而这个假想实验就是被设计出来说明这一点的。在相对论中，光速是自然的一个普适常数。无论使用什么样的惯性参照系，光速总是相同的。从那时起，爱因斯坦的火车便继续开拓了这个根本变革的物理结果。

实验方法是由近代科学建立起来的人与自然对话的主要方法。被如此提问的自然，当然是简化了的，而且偶尔还是残缺不全的。但这并不能剥夺它驳倒我们所能想象的大多数假设的能力。爱因斯坦常说，自然对于向它提出的绝大多数问题都回答“不”，偶尔说“也许是”。科学家不能只做他高兴的事，不能强迫自然只说他爱听的话。至少从长远的观点看来，他不能在自然上面寄托他所抱的要求和希望。他包围自然、把自然逼入困境的战术越是成功，他实际上就是在进行更大的冒险和做更加危险的游戏。而且，无论答案是“是”还是“否”，事实上这答案将总是和问题用同一种理论语言表达。不过，随着某个复杂的历史过程(该过程涉及自然在过去所作的回答)，随着它与别的理论语言的关系，这种语

言本身也在不断发展。此外，相应于各个时期的兴趣变化，人们还提出了一些新的问题。这便在科学游戏的特殊规则——特别是实验方法(实验方法是和自然讲理的，而自然为该游戏带来最大的约束)和某个文化网络(科学家们便属于这个文化网络，尽管有时是不知不觉地)之间建立了复杂的关系。

我们相信，实验对话是人类文化的一个不可逆的成就。实际上它提供了一个保证：当人类开发自然的时候，自然是被当作一个独立的存在对待的。它组成了科学成果的可传授性和可再生性的基础。尽管自然是部分地被容许讲话的，然而它一旦表达了它自己，就不再另有异议：自然从不说谎。

5 科学发祥的神话

人与自然之间所进行的对话，曾经作为向着自然的智能迈出的基本一步而被近代科学的奠基者们准确地察觉到。但是他们的雄心还要更大些。伽利略及其追随者们把科学想象为是能够发现关于自然的全局性真理的。自然不仅是用一种可被实验解释的数学语言写出的，而且实际上也只有一种这样的语言。根据这一基本信念，世界被看作是均匀的，而且局部实验可以揭露出全局的真理。这样，科学所研究的最简单现象就能被解释成理解整个自然的关键，后者的复杂性仅是表面上的，其多种多样性在伽利略那里可以用数学的运动定律中体现出的普适真理来解释。

这种信念存在了几百年。在几年前英国广播公司提供的一套精美的讲义里，理查德·费曼*把自然比作是一盘巨大的棋赛。复杂性只是

* 费曼 (Richard Feynman，1918—)，美国物理学家，1965 年诺贝尔物理学奖得主。——译者

表面的,每一着棋都遵从一些简单的规则。在最初的日子里,近代科学十分可能需要这个能够达到全局真理的信念。这种信念为实验的方法增加了极大的价值,并在某种程度上鼓励了实验方法。一个革命的世界概念,一个像亚里士多德世界的“生物”概念那样包罗万象的概念,也许是抛却传统之轭,给实验战士们以坚强信念和有力论据使他们能坚持反对先前形式的唯理主义所必需的。形而上学的信念也许是把手工工匠和机器制造者的知识变成对自然进行理性探讨的新方法所必需的。我们可能还要问:这种“神话”般信念的存在,究竟有些什么含义,去解释近代科学的首次发展被社会环境所接受的方式。关于这个争议颇多的问题,我们将把我们自己限制在几种最一般性的意见之中。我们的惟一目的是强调这里的问题,即有关某种科学的问题,这种科学的前进曾被一些人看作是理性的胜利,而被另一些人看作是一种觉醒,看作是痛苦地发现了自然像机器人一样愚笨。

看来很难否认,社会和经济的因素——特别是工匠技术在寺院中的发展(在寺院中,一个遭到破坏的世界的残余知识被保存下来)以及后来在喧闹的商业城市中的发展——在实验科学(实际上就是一部分被系统化了的工匠知识)的产生中所具有的基本的重要性。

此外,比如说李约瑟所作的对比分析,说明了在中世纪末期社会结构所具有的决定性的重要意义。不仅工匠阶级和潜在的技术发明者不像在古希腊时那样受到蔑视,而且知识界也像工匠一样几乎独立于当权者。他们是自由创业者,是寻找主顾的工匠发明家,无论他们可能对社会秩序来说有多么危险,他们总是注意寻找新鲜事物并利用它所提供的一切机会。另一方面,如李约瑟指出的,中国科学家是有官职的,而且必须服从官僚的统治。他们组成了国家的一个不可分割的部分,其基本目的是维持法律和秩序。指南针、印刷术和火药,所有这些都为破坏

中世纪社会的基础并把欧洲投入到现代的纪元作出了贡献，它们都是中国在早得多的时候发明的，但对中国社会所起的不稳定的作用却要小得多。相比之下，企业化的欧洲商业社会特别适合于刺激和维持近代科学在其早期阶段的动态的和创新的生长。

但是，问题依然存在。我们知道，机器的制造者使用数学的概念——齿轮转速比，各工作零件的位移，以及它们相对运动的几何学。但为什么数学化没有被限制在机器上呢？为什么在理性机器的图像中设想出自然的运动呢?这个问题也可以就钟表提出，钟表是中世纪手工艺的胜利之一，它很快就定出了较大的中世纪城市的生活节奏。为什么它几乎立即就成为世界秩序的精确标志？在这个最后的问题中可能孕育着某种答案的一些要素。钟表是受到处于其自身之外的理性支配，受到由其内部机件所盲目执行的计划支配的一种装置。钟表世界是一个隐喻，它暗示着有一个钟表匠上帝，即像机器人一样的自然的理性主人。在近代科学的发祥地，在神学说教与理论和实验的活动之间好像已经建立起“共鸣”，这个共鸣似乎无疑要扩大和巩固认为科学家处在发现“宇宙大机器”的秘密的过程之中的主张。

共鸣这个术语当然包含了极复杂的问题。我们没有意图要说明，我们也不能肯定，宗教说教无论如何决定了理论科学的诞生，或决定了偶然在和实验活动的联系中发展起来的“世界观”的诞生。通过共鸣这个术语，也就是通过两种论述的彼此相互放大，我们故意选择了这样一种表达，这种表达不假定究竟是神学说教还是“科学神话”首先出现并触发了另一个的出现。

让我们提一下，对某些哲学家来说，西方科学的“基督发端”的问题并不仅是使把自然比做一个自动机的概念稳定化的问题，而且还是这样的实验科学与希伯来和古希腊的西方文明之间某种“基本”联系的问

题。对于怀特海来说,这种联系是处于本能信念的水平上的。这种信念对于鼓励近代科学奠基者们的“科学忠诚”来说是“必要的”。

我的意思是指那不可动摇的信仰，即所发生的每一事件的细节都可以按照给一般原理作出例证的完全确定的方式同它的先导联系起来。没有这个信仰，科学家的难以置信的劳动就没有希望。正是这个本能信念，活生生地悬在想象之前，成为研究的动力：相信这里有一个秘密，可以被揭露的秘密。这个信念是怎样被活生生地植入欧洲思想之中的呢?

当我们把这个欧洲人的思想状态和其他文明(当听任它们自行其是时)的态度作一对比的时候，好像它只有一个源泉。它一定是来源于中世纪对于上帝理性的坚持，这个上帝被想象为具有耶和华的个人能力以及某位古希腊哲学家的理性。每个细节都被监督着和命令着：对自然进行探索的结果只能证明忠于理性的正确性。请记住，我并非在谈论几个人的明确信仰。我的意思是指从几个世纪的坚信不疑中产生的欧洲思想上的印记。我这里指的是本能的思想状态而不仅是字面上的教义。

我们不再深入考虑这件事情。要“证明”近代科学只能在基督的欧洲诞生,是不可能的。甚至没有必要去问,近代科学的奠基者们是否在实际上曾从神学论据中得到鼓舞。不论他们是否真诚,重要的是,在经历了不同国家中各不相同的一段时期之后，这些论据使得近代科学的推测在社会上是可信的和可接受的。在十九世纪英国的科学著作中还经常引用宗教文献。奇怪的是,在当今对神秘主义重感兴趣的人那里,

这个论据好像倒过来了。现在,像是科学把可信性借给了神秘的断言。

这个科学起源的问题显然引出了许多问题，其中神学和科学的论点无法摆脱地联系着科学的“外部”历史(即一方面是关于科学知识的形式与内容之间的关系的描述,另一方面是科学知识在社会、经济和风俗方面的应用)。如我们已经说过的,我们现在惟一感兴趣的正是科学论述的特殊性质和含义,这科学论述通过和神学说教的共鸣而被放大。

李约瑟讲了十八世纪的中国文人在祝贺耶稣会宣告近代科学的胜利时所用的讽刺话。在十八世纪的中国文人看来,自然界被一些简单的可知的法则所统治的思想成了以人类为宇宙中心的愚昧的最好例证。李约瑟相信这个“愚昧”有其深刻的文化根源。为了说明西方概念与中国概念的巨大差别,他引述了中世纪的动物审判案。在某些场合,例如对被推测为下蛋的公鸡那样的怪物应被严肃处死或烧掉，因为它们违反了自然的法则,而后者是与上帝的法则等同的。李约瑟解释了,在中国同样的下蛋公鸡将很可能只会悄悄地处理掉。它没有犯任何罪,但它的怪事是与自然和社会的谐和相抵触的。如果这只公鸡的怪事被人知道了,那么地方官吏甚至皇帝就会发觉他们自己处于难以对付的境地。李约瑟评论说,依照在中国占统治地位的哲学概念,宇宙是在自发的和谐之中,现象的规则性并不是来自外部的当权者。相反,自然、社会和天国中的这个和谐发源于这些过程中存在的平衡,这些过程是稳定的,互相依存的,并在非一致的和谐中彼此共鸣。假如涉及到什么法则的话，那么它将是任何人(不管是上帝还是凡人)所未曾想象过的法则。这样的法则也一定要用人所不可解释的语言表达，而不是在我们自己想象中的一个造物者所建立的法则。

李约瑟以提出下面的问题来作为结束：

在近代科学的观点上，自然“法则”中当然没有命令和职责等提法的任何残余。这些提法现在被想象为统计的规则，即只对给定的时间和空间有效。如卡尔·皮尔逊(Karl Pearson)在著名章节中指出的那样，这些提法是描述而不是处方。在从马赫到爱丁顿的整个时期中，在表述科学定律时主观性的确切程度经过了激烈的辩论，这样的问题不能在此作进一步讨论。问题是，要达到对这样的统计规则及其数学表达的认识，除了西方科学所实际走过的路以外，还有没有其他的路可走？认为可对下蛋的公鸡依法起诉的想法，在后来具有产生开普勒的特点的文化中可能会是必要的吗？

现在必须强调指出，科学论述绝不仅是传统宗教观点的变换。经典物理学所描述的世界显然不是《创世记》的世界，在《创世记》的世界里上帝创造了光、天、地，以及活着的万物，并且在这个世界里，上帝从未停止活动，即促使人向着某种历史疾驰，在那里，他得救的命运濒于危险之中。经典物理学的世界是一个非永恒的世界，如果它是创造出来的话，那么它一定是一下子创造出来的，就像工程师创造机器人然后让它自由行动一样。在这种意义上，物理学的发展确实既与宗教又与传统哲学对立。然而，我们知道，基督的上帝实际上是被召唤来为世界的可理解性提供基础的。事实上，人们在此可以说到一种在主张世界不得不由于它对上帝的完全屈从而承认上帝万能的神学家的兴趣和寻找一个可数学化过程的世界的物理学家的兴趣之间的“汇合”。

无论如何，被近代科学破坏了的亚里士多德世界对于这些神学家和物理学家来说都是不可接受的。这个有序的、和谐的、分层次的和合理的世界太独立了，在其中居住的人类太有力和太能动了，而且他们对

绝对权威的奴性太可疑且对许多神学家的需要来说太有限了。另一方面,它又太复杂并具有太大的质的差别,以致无法被数学化。

近代科学的这个“机械化”的本性是依据一个使其受到完全统治的计划建立和管理的，但它并不知道这个计划。这个本性为其创造者增光,并因此而令人羡慕地适合于神学家和物理学家的需要。尽管莱布尼兹努力论证数学化是与一个可以显示能动的和性质上不同的行为的世界相容的,但是科学家和神学家还是联合起来,努力把自然描述成一个没有思想的、被动的机构,而这基本上是和自由以及人类思想的目标不相容的。“一个呆笨的事物,无声、无臭、无色,仅仅是事物的混乱,无目的,无意义”,如怀特海所观察的那样。这个基督的自然被剥夺了使人能与自然“演化”的古老的和谐打成一片的任何特性,让人去和上帝面对面，因而它和只需用一种语言而不必用莱布尼兹所听到的上千种数学声音就足以描述的那种自然汇合起来了。

神学也许还能帮助我们评论人在努力地解释统治世界的法则时所处的奇特地位。人类断然不是他客观描述的自然的一部分;他从外部去统治自然。的确,对于伽利略来说,按照上帝的形象创造出的人类的灵魂能够掌握作为创造计划的基础的可理解的真理。因此人类的灵魂能逐渐接近上帝自己直觉地、全面地并且在一瞬间占有的世界知识。

近代科学家不同于古代原子论者（他们在无神论的罪名下遭到迫害)，也不同于莱布尼兹（他被怀疑犯了否认仁慈和人类自由存在的过错)。近代科学家设法提出了他们事业中的一个在文化上可被接受的定义。纳入服从于自然法则的躯体的人类思想可以用实验装置来逐渐达到这样的优势地位(上帝自己正是从这个地位俯瞰世界的),达到这样的神明方法(我们的世界就是该神明方法的明确表达)。不过,人类思想本身却留在它所完成的成果的外面。科学家可以把组成自然结构的每一

件东西，如它的气味、颜色等，描写为次级性质，这些性质不是自然的一部分，而是思想加在其上的。自然的减色是与一切躲避它的东西的增光、上帝和人的增光并驾齐驱的。

6 经典科学的局限性

我们已经尝试着描述了科学实践与形而上学信念紧密耦合的那种独特的历史情形。伽利略以及他的追随者们提出了中世纪建设者们所提出的同样问题，但是放弃了他们的经验知识，以便借助于上帝去断定世界的简单性和实验方法所要求和解释的语言的普适性。这样，作为近代科学的基础的这个基本神话可以看作是这个特殊复杂性的产物，该复杂性在中世纪末建立起经济、政治、社会、宗教、哲学和技术各因素之间共鸣和相互放大的条件。但是，这个复杂性的迅速分解使经典科学在一种变了形的文化中处于困境并受到孤立。

经典科学是在人和上帝的同盟所统治的文化中诞生的，人居于神明的秩序和自然的秩序之间，而上帝是理性的和可理解的立法者，是我们按照自己的形象想象出来的最高建筑师。经典科学经历了这个文化和谐的瞬间而存在下来。这个和谐曾使哲学家和神学家有资格去从事科学活动，使科学家有资格去解释和表达有关神明在创世工作中的智慧和能力的观点。得到宗教和哲学的支持，科学家们相信他们的事业是自给自足的，就是说它用尽了合理研究自然现象的一切可能性。科学描述与自然哲学之间的关系在这个意义上并非必须被证明是正当的。不言而喻，科学和哲学是汇合在一起的，科学发现了权威性的自然哲学的原理。但奇怪的是，科学家所经验的自足性，其寿命比中世纪上帝的离去和神学提供的认识论保证的撤退还要长久。最初大胆的赌注已变成

了十八世纪胜利的科学，即发现了天体和地球运动定律的科学，被达兰贝尔和欧拉纳入了一个完整一致的系统中的科学，这一科学的历史被拉格朗日确认为向着完善发展的逻辑成果。这是由路易十四、弗里德里希二世和凯瑟琳大帝等人的绝对君权所建立的科学院给予了荣誉的科学，是使牛顿成为民族英雄的科学。换句话说，这是成功的科学，它确信：自然已被证明是透明的。拿破仑曾经问拉普拉斯在他的世界体系中上帝的地位如何，拉普拉斯的回答是："我不需要这个假设！"

近代科学的二重性含意，要和它的主张一样存在下去。对于拉普拉斯的科学(在许多方面它仍是今天科学的经典概念)来说，描述的客观性已到了这样的程度，即观察者是排除在其外的，描述本身来自当然是处于世界之外的某一点，就是说来自神明的观点，凭上帝的想象所创造出的人的灵魂从一开始就接近这个观点了。因此，经典科学的目标仍是发现关于世界的惟一真理，发现解释整个自然的那一种语言——今天我们应说是基本水平的描述，从这描述出发，每个存在的事物都能被推演出来。

关于这个基本观点，让我们引述爱因斯坦的话，他把我们所谓作为近代科学的基础的基本神话准确地用现代术语翻译出来：

> 理论物理学家的世界图像在所有这些可能的图像中占有什么地位呢？它在描述各种关系时要求尽可能达到最高标准的严格的精确性，这样的标准只有用数学语言才能达到。另一方面，物理学家对于他的主题必须极其严格地加以限制：他必须满足描述我们的经验领域里的最简单的事件；企图以理论物理学家所要求的精密性和逻辑完备性来重现一切比较复杂的事件，这不是人类智力所能及的。高度的

纯粹性、明晰性和确定性要以完整性为代价。但是当人们畏缩而胆怯地不敢去管所有不可捉摸的和比较复杂的东西时，那么能吸引我们去认识自然界的这一渺小部分的究竟又是什么呢？难道这种谨小慎微的努力结果也够得上宇宙理论的美名吗？

我认为，是够得上的；因为，作为理论物理学的结构基础的普遍定律，应当对任何自然现象都有效。有了它们，就有可能借助于单纯的演绎得出一切自然过程(包括生命)的描述，也就是说得出关于这些过程的理论，只要这种演绎过程并不太多地超出人类理智能力。因此，物理学家放弃他的世界体系的完整性，倒不是一个有什么基本原则性的问题。

有一段时间，一些人曾坚持过这样的幻想，即引力(在引力定律中表达出的那种形式的引力) 将证明应当把一种固有的生气归因于自然，如果这个引力被推广的话，那么，它应能解释越来越特殊的活动形式的起源，甚至包括组成人类社会的相互作用。但是这个幻想很快就破灭了，至少部分地是作为使科学得到发展的政治、经济和风俗环境所提出的要求的后果而破灭的。我们不打算讨论问题的这个方面，虽然它是重要的。我们这里的观点是要强调：正是这一失败看来要导致建立经典观点的一致性，并证明曾经是个鼓舞人心的信念的那种东西只是一个可悲的真理。实际上，在这以后，显然能和这种对科学的解释相匹敌的惟一解释就是对那个认识世界的方案作出实证主义的拒绝。例如，恩斯特·马赫这个有影响的哲学-科学家(他的思想曾对年轻的爱因斯坦产生过巨大影响)，把科学知识的任务定义为按照尽可能经济的一种次序去安排经验。科学除了对事实的最简单、最经济的抽象表达以外，并没

有其他有意义的目标：

> 这里我们得到一个线索，它剥掉科学的一切神秘性，并向我们表明它的真正能力是什么。至于具体的结果，则它并没有给我们任何我们在足够长的时间内不以任何方法所不能得到的东西。……恰如一个人，如果被完全限制在他自己的劳动果实上，他就永远不可能积累财产。但是相反，许多人的劳动累积在一个人的手里就成为财富和权力的基础。因此也可以说，除非通过最巧妙的思想节省，以及通过几千个合作者按经济方式安排的经验的精心积累，任何值得一提的知识都不可能被集中到一个人的头脑之中。因为一个人的寿命和天赋能力都是有限的。

这样一来，科学之所以有用，便是因为它导致思想的节省。在这种说法里可能有某些真理的成分，但它说出始末原委了吗？这里我们离牛顿、莱布尼兹以及西方科学的其他奠基者有多远啊！他们的志向是给出物理世界的一个有智能的框架。这里，科学引出了一些有益的行动规则，此外再没有别的。

这一点把我们带回到我们的出发点，带回到这样的思想上：在一段时期中被当作文化统一的象征的乃是经典科学，而不是导致我们已描述过的文化危机的那种科学。科学家们发现他们被迫在"科学神话"的雷鸣和"科学严肃性"的寂静之间盲目摇摆，在肯定科学真理的绝对性、普适性和退入作为有效地介入自然过程的实用主义诀窍的科学理论概念之间摇摆。

如我们已经说过的那样，我们赞同这样的观点：经典科学现在已经

达到了它的极限。这个转变的一个方面是发现了经典概念的局限性，经典概念暗示了可能存在某种“照本来样子”的世界知识。无所不知的存在物，拉普拉斯或麦克斯韦的小妖，或爱因斯坦的上帝，这些在科学推理中扮演如此重要角色的存在物体现着物理学家认为容许他们作的某些外推。由于随机性、复杂性和不可逆性作为实在知识的对象而进入物理学，我们正在离开这个认为在我们对世界的描述和世界本身之间有着直接联系的十分天真的假定。理论物理中的客观性具有一种更为微妙的意义。

这个演变被一些意外的附带的发现强加到我们头上。这些发现证明，普适常数(例如光速)的存在限制了我们控制自然的能力。(我们将在第七章中讨论这个意想不到的情况。)于是，物理学家不得不引入一些新的数学工具，使得在感知和解释之间的关系更为复杂。无论现实的意义可能是什么，它总是对应于一种积极的智能结构。科学所给出的描述不再能和我们提问的活动分开，因此不再能被归因于某个无所不知的存在物。

在牛顿综合的前夕，约翰·多恩*曾悲叹过被哥白尼所破坏了的亚里士多德宇宙的逝去，他写道：

新哲学召来一切疑虑，
火种已被完全掩熄；
太阳和地球已经远走高飞，
人的智慧不能引导他去将它们寻觅；
人们直率地承认这个世界已力尽筋疲，

---

* 多恩(John Donne，1572—1631)，英国17世纪诗人。——译者

在行星和苍穹中，

他们寻找如此多的新世界，

然后看到这个世界又重被瓦解为他的“原子”碎粒；

一切都化为断片，

一切凝聚都已离去。

我们现今文化的破砖碎石，也像多恩时代的一样，似乎可以被放入一个新的“凝聚”之中。经典科学，简单被动世界的神话科学，已属于过去，它没有被哲学批判或经验主义的抛弃所扼杀，但却被科学自身的内部发展所灭亡。

第二章　现实的同一

1　牛顿定律

现在我们来仔细地看一下由于伽利略、牛顿以及他们的继承人的工作而出现的机械论的世界观。我们要清楚地了解它的长处——它成功地阐明了的自然界的一些方面——但我们也要估计到它的局限性。

自从伽利略以来，物理学的中心问题之一是对加速度的描述。一个令人惊奇的特点就是物体运动状态的变化能够用一些简单的数学术语来表述。今天我们看来这似乎是极平常的。我们还应记得，在许多领域中取得如此成功的中国科学并没有得出运动定律的定量公式。伽利略发现，如果运动是匀速的话，我们就无需寻求这个运动状态的原因，就像不必去问静止状态的原因一样。无论运动还是静止都将永远保持无限的稳定，除非某种事情偶然扰乱了它们。中心的问题是从静止到运动和从运动到静止的变化，以及更一般地说，一切速度的变化。这些变化是如何发生的？牛顿运动定律的精确表述利用了两个汇合在一起的研究成果——一个在物理学中，即开普勒行星运动定律和伽利略落体定

律，另一个在数学中，即微分或微积分。

怎样才能确定一个不断变化着的速度？我们如何去描述各种量如位置、速度和加速度的瞬时变化，如何描述物体在给定瞬时的状态？为了回答这些问题，数学家引入了无穷小量的概念。无穷小量是一个极限过程的结果，典型地说，它就是在两个相继瞬时之间发生的某个量当这两个瞬时之间的时间间隔趋于零时的变化。按这样的方法，变化就被分成许多无穷小的变化的一个无穷序列。

在任一瞬间，某个运动物体的状态可以由它的位置 r、表征该物体改变其位置的“瞬时趋势”的速度 v 和表征物体改变其速度的“瞬时趋势”的加速度 a 确定。瞬时速度和加速度是量度两个无穷小量即在时间间隔 Δt 内 r(或 v)的变化与该时间间隔 Δt 的比率的量当 Δt 趋于零时的极限值。这样的量就是所谓“对时间的导数”，自莱布尼兹以来一直写成 $v=dr/dt$ 和 $a=dv/dt$。因此加速度，即导数的导数 $a=d^2r/dt^2$，就变成一个“二阶导数”。在牛顿的物理学里，中心的问题就是计算这个二阶导数，即计算构成一个系统的各个点在每一瞬间的加速度。要计算在一个有限的时间间隔内这些点的运动，可以通过积分，即将发生在这间隔内的无穷小速度变化相加。最简单的情形是 a 为常数(例如，自由落体的 a 就是引力常数 g)。一般地说，加速度本身是随时间变化的。物理学家的任务就是去精确地确定这一变化的性质。

在牛顿的语言中，研究加速度意味着确定作用在所研究的系统中各点上的各种“力”。牛顿第二定律 $F=ma$ 指出，作用于任一点的力与该点所产生的加速度成正比。在质点系统的情况中，问题较为复杂，因为作用在一个物体上的力在每一瞬间都取决于该系统中各物体间的相对距离，因而在每一瞬间，由于它们自身所产生的运动，作用力是各不相同的。

在力学中，一个问题被表达为一组“微分方程”的形式。系统中每一物体的瞬时状态被描述为一个点，且被它的位置以及它的速度和加速度即位置的一阶和二阶导数确定。在任一瞬间，一个力系是系统中各点间距离的函数(r 的函数)，它为各个点给出精确的加速度；然后这些加速度带来这些点之间距离的变化，由此又带来在下一瞬间所作用的力系的变化。

微分方程组提出了这个动力学问题，与此同时，这些微分方程的“积分”代表该问题的解。它导出轨迹 $r(t)$的计算。这些轨迹包括了动力学认为有关的一切信息，它们的计算给出对该动力学系统的完整描述。

因此，这一描述包含两个要素：一个要素是每一点在某个瞬间的位置和速度，这一瞬间通常叫做“初始瞬间”。另一个要素是把动力学的力和加速度关联起来的运动方程。动力学方程的积分将从这个“初始状态”出发逐渐伸展到相继的状态，即组成系统的各物体的轨迹的集合。

牛顿科学的胜利就是发现了：一个力，即引力，既决定了天空中行星和彗星的运动，也决定了落到地球上的物体的运动。无论考虑什么成对的物体，牛顿系统指出，它们被同一个引力所联接。牛顿动力学从而成为更加普适的了。描述质量之间倾向于互相接近的引力定律的定义没有涉及现象的任何尺度问题，它同样能适用于原子、行星以及银河系中恒星的运动。任何物体，不论大小，都有质量，都可以作为牛顿相互作用力的源头。

由于在任意的两个物体之间都有引力存在着（两个质量分别为 m 和 m' 且相距 r 的物体，其引力为 kmm'/r^2，其中 k 是牛顿引力常数，约等于 6.67 厘米^3/克秒^2)，因此，惟一正确的动力学系统应是整个宇宙。任何局部的动力学系统，例如我们的行星系统，只能近似地定义，即，和那些需计及其效果的力相比起来较小的力被忽略了。

必须强调指出，无论选取何种动力学系统，运动定律都可表示为 $F=ma$ 的形式。除去引力以外，有可能发现其他类型的力(并且实际上已被发现了——例如，电的吸引力和排斥力)，因而运动定律的经验内容应作某些修改。但是不管怎样，将不修改它们的形式。在动力学的世界里，变化等同于加速或减速。运动定律的积分导出粒子所遵循的轨道。因此，变化的规律，即时间对自然的作用的规律，是用轨道的特性来表示的。

轨道的基本特性就是合法性、决定性和可逆性。我们已经看到，为了计算一个轨道，除了我们关于运动定律的知识以外，我们还需要凭经验确定出这个系统的某一瞬时状态。然后利用一般的运动定律从这个"初始状态"推演出系统随着时间的推移所经历的一系列状态，就好像逻辑推理从基本前提推演出结论一样。值得注意的一点是，一旦知道了作用力，任何一个态都足以完全确定该系统，不但确定它的未来，而且确定它的过去。因此，在任一瞬间，一切都是给定的。动力学把所有的状态都定义成是等价的：每一个状态都允许沿着轨道计算出所有其他状态，这轨道连接着所有的状态，无论是过去的状态还是未来的状态。

"一切都是给定的"，这个被柏格森反复强调过的经典力学的结论标志着动力学所描述的现实性。任何事物都是给定了的，但是任何事物也是可能的。一个有能力去控制动力学系统的人可以这样地去计算正确的初态，使得系统在某一选定时刻"自发地"达到被选定的状态。动力学定律的普遍性是与初始条件的任意性相提并论的。

动力学轨道的可逆性是被所有的动力学奠基者明确指出的。例如伽利略和惠更斯在描述因果之间等价性的含义且以此作为他们对运动作数学描述的基础时，他们筹划出一些假想实验，比如一个弹性球在地面上的反弹。由于其瞬时速度的倒转，这样的物体将返回到其初始位

置。动力学使所有的动力学变化具有这个可逆的特性。这个早期的“假想实验”说明了动力学方程的一般数学特性。这些方程的结构意味着，如果系统内的所有点的速度被倒过来，那么这个系统将会实现“时间倒流”，它将回溯到它在以前的变化中所经历过的各个状态。动力学把某些变化，比如时间反演 $t\rightarrow -t$ 和速度反演 $v\rightarrow -v$，定义为在数学上是等价的。一个动力学变化所得到的东西可以被另一个(由速度反演所确定的)变化抵消，这样便恰好恢复到原来的状态。

可是，动力学中的这种可逆的特性带来了一个困难，其充分的意义仅当量子力学引入之后才表现出来。操作和测量在本质上是不可逆的。于是，按定义，能动的科学与它所描述的理想化的可逆世界无关。从更一般的观点来看，可逆性可以看作是动力学所描述的世界的“奇妙”的真正象征。每个人都熟悉倒着放映的影片所产生的荒谬结果——火柴被它的火苗再生，打破的墨水瓶在墨水注回到它里面之后又完整地回到桌面上，树枝重新长得幼小并变成新芽。在经典力学的世界里，这样的事件被认为是和普通事件一样可能的。

我们非常习惯于我们早年在学校中学到的那些经典动力学定律，以致我们竟时常意识不到这些定律所依据的假定是多么大胆。所有轨道均为可逆的世界的确是一个奇怪的世界。另一个使人吃惊的假定是初始条件与这些运动定律完全无关。拿起一块石头并以某个初始速度投出(初始速度只受到人的体力的限制)是可能的，但是像由许多粒子组成的气体那样的复杂系统，情形又是怎样呢?显然，我们不再能够给出任意的初始条件。初始条件一定是动力学演变本身的结果。这是一个重要的问题，我们将在本书的第三部分回到这个问题上来。但是，无论经典动力学有怎样的局限性，今天，在三个世纪之后，我们只能羡慕经典动力学奠基者们所发现的方法的威力和逻辑上的一贯性。

2 运动和变化

亚里士多德把时间作为变化的度量，但他完全懂得自然变化的质的多样性。在动力学中还是只有一种变化，一个“过程”，那就是运动。自然变化在性质上的千差万别都归结为研究物体的相对位移。时间是一个参量，这些位移用它才可以被描述。这样，空间和时间在经典动力学世界中不可分地联系在一起(见第九章)。

用原子论者关于变化的概念与动力学的变化作一对比是很有意思的。原子论者的变化概念在牛顿表述其定律的时候曾享有显著的厚遇。实际上，看来不仅笛卡儿、伽桑狄和达兰贝尔，而且连牛顿本人都相信坚硬原子之间的碰撞是运动变化的最终的、而且或许是惟一的源泉。不过，动力学的和原子的描述有根本的不同。实际上，力学方程所描述的加速度的连续性与硬粒子之间瞬时碰撞的不连续性有明显的区别。牛顿已注意到，和动力学相矛盾，在每一次硬碰撞中都引起运动的不可逆性的损耗。惟一可逆的碰撞，也就是说惟一符合于动力学定律的碰撞，是所谓“弹性”碰撞，即动量守恒的碰撞。但是“弹性”的复杂性质怎么能够适用于被假定为自然界基本元素的原子呢?

另一方面，在一个不大要求专门技术的水平上，动力学运动定律看来和通常被认为是原子之间碰撞的属性的随机性是矛盾的。古代的哲学家们已经指出，任何自然过程都能够通过原子的运动和原子间的碰撞用多种不同的方法来加以说明。对于原子论者来说，这不是个问题，因为他们的主要目的是描述一个没有神的、没有法规的世界，在那里人们是自由的，能够指望在任何神的或自然的秩序中既不会受到惩罚也不会得到报酬。但是，经典科学是工程师和天文学家的科学，是行动和

预言的科学。基于假想原子的推测不能满足它的需要。相反,牛顿的定律却为预言和操作提供了一个手段。从此,自然变成有规律的、驯良的和能预言的,而不再是混沌的、不守秩序的和随机的。但是,在那原子不停地结合和分离着的、动荡不安的世界与那个被牛顿定律、即一个数学公式(对应于向着重复的未来而展开的永恒真理)所统治的不变的动力学世界之间有什么联系呢?在二十世纪,我们再次碰见规律性与随机事件之间的冲突。正如柯伊莱所说的,这个冲突曾使笛卡儿苦恼过。从十九世纪末起,伴随着气体动力论,原子的混沌说重新使物理学成为一个整体,动力学定律和统计描述之间的关系问题贯穿到物理学的核心,它是今天动力学更新的关键因素之一(见第三编)。

可是,在十八世纪,这个矛盾似乎要导致一种僵局。这可以部分地解释当时某些物理学家对牛顿的力学描述的重要性所感到的疑惑。我们已经注意到,碰撞可以导致运动的损耗。他们因此推断在这种非理想的情况下,"能量"并不守恒,而是不可逆地耗散了(见第四章第 3 节)。所以原子论者不得不把动力学看作是一个极限值的理想化。从而在一个很长的时间里,欧洲大陆的物理学家和数学家如达兰贝尔*、克莱罗**和拉格朗日等抵制过牛顿学说的诱人的魅力。

牛顿的变化概念的根据在哪里?这个概念是理想机械(在那里,运动通过接触在各零件之间传递,没有碰撞或摩擦)的科学与远距离相互作用的天体的科学的一个综合。我们已看到,它和基于随机碰撞概念的原子论正相对立。但是这一点能够证明某些人的下述看法吗?他们相信,牛顿动力学代表了思想史上的一次决裂,一个革命性的新事物。实证主

---

* 达兰贝尔(Alembert, d, 1717—1783),又译成"达朗伯",法国数学家,自然科学家。——译者

** 克莱罗(A.C.Clairaut, 1713—1765),法国数学家、天文学家。——译者

义的历史学家在讲述牛顿如何摆脱了预想概念的符咒并且有勇气从行星运动和落体定律的数学研究中推断出“万有”引力的作用时，他们所主张的正是这一点。我们知道，正好相反，十八世纪的唯理论者强调在牛顿的“数学”力和传统的玄妙性之间有明显的类似。幸好，这些批评家并不知道牛顿力的后面所隐藏着的奇怪故事，因为牛顿在谈到力的性质时小心翼翼地宣布的“我不构造任何假设”的声明后面潜伏着一个炼金术士的感情。现在我们知道，牛顿在进行数学研究的同时，曾用了三十年的时间研究古代炼金术，并曾进行过艰难的实验室实验去探索实现合成金子这一杰作的方法。

近来，有些历史学家已经走得如此地远，以致提出：统一天和地的牛顿的综合是一个化学家而不是一个天文学家的成就。牛顿力使物质“具有生命”，在术语的更强意义上来说，它组成了自然界的活性，因此这个力是牛顿作为化学家所观察和操纵的力即化学“亲和力”的继承者，这个化学亲和力不停顿地形成和分裂新的物质组合。当然，天体运行的轨道所扮演的角色仍具有决定意义。还是在他开始进行认真的天文学研究的时候——大约1679年，牛顿显然仅指望在天空中找到新的吸引力，这种力类似于化学力，并且或许较容易地从数学上去研究。六年以后，这一数学研究产生了意想不到的结论：行星之间的力和使自由落体加速运动的力不仅相似，而且就是同一个力。引力不是专对每个行星的，对于围绕地球的月亮，对于行星，甚至对于穿过太阳系的彗星，引力都是同一个。牛顿开始打算在天空中发现一些和化学力相似的力：一些特殊的亲和力，对于不同的化合物它们是不同的，而且给不同的化合物以不同性质的活性。他实际上发现的却是一个普适的规律，正如他所强调的，这个规律能适用于自然界中的所有现象——无论是化学的、机械的或者是天体的现象。

因而，牛顿的综合是一个奇迹，它是一个意想不到的令人目瞪口呆的发现，科学界通过把牛顿作为近代科学的象征来纪念这个发现。尤其使人吃惊的是：自然界的基本密码竟在一个简单的创造行为中被打破。

有一个很长的时期，这个突如其来的自然的饶舌，这个英国摩西的胜利，招来了欧洲大陆唯理论者的理智的愤慨。牛顿的工作被看作是纯粹经验的发现，因而它同样可以从经验上被驳倒。在1747年，欧拉、克莱罗和达兰贝尔这些在当时无疑是最伟大的科学家得出同样的结论：牛顿错了。为了描述月球的运动，必须给吸引力以更复杂的数学形式，使它成为两项之和。随后的两年中，他们当中的每一个都相信自然已经证明牛顿错了，而且这一信念是使人兴奋而不是使人沮丧的源泉。物理学家根本不把牛顿的发现看作是物理科学本身的同义语，他们一起轻率地想把牛顿的发现丢弃掉。达兰贝尔甚至为了寻找新的证据去反对牛顿并且对牛顿“落井下石”而感到有些不安。

仅有一个勇敢的声音在法国升起来，反对这个裁决，这就是布丰*，他在1748年写道：

> 物理学定律作为一个定律仅仅凭借如下的事实，即它易于测量，它所描述的范围不仅总是相同的而且实际上是惟一的……M·克莱罗对牛顿系统提出了异议，但这充其量也只不过是个异议而已，它决不会成为、也不可能成为一个原理，应当设法克服它而不是把它变成一种理论，其全部结果仅依据某个计算。因为正如我所说的，人们可以用计算的方法表示任何事物但结果什么也得不到；如果允许

---

* 布丰(Buffon，1707—1788)，法国博物学家，作家。——译者

对一个物理学定律例如吸引力的定律增加一个或多个项，那么我们所作的仅仅是增加任意性而不是表现现实。

后来，布丰宣布了什么将成为化学的研究纲要，虽然仅是短期的纲要：

亲和力定律(由于它，不同物质的成分彼此分离出来，组合在一起形成均匀物质)和支配着一切天体彼此相互作用的普遍规律一样，它们以同样的方式作用，具有同样的质量和距离的比率。一个水的小球、石头的小球或金属的小球对另一小球的作用如同地球对月球的作用一样。如果化学亲和力的规律到目前为止还被认为和重力规律不同，那是因为它们还没有被充分地了解，没有被完全地把握住；那是因为问题的整个范围没有被考虑到。在天体的情况下，由于涉及的距离极大而对物体间相互作用的规律影响很小或没有影响的形状，当距离非常小或等于零时就反过来成为十分重要的了……我们的子侄将可能通过计算达到这个知识的新领域[即从基本物体的形状上推演出它们之间相互作用的定律]。

历史要证明自然主义者是对的，对于他们来说，力不仅是数学技巧，而且是新的自然科学的真正本质。后来，物理学家被迫承认了他们的错误。五十年以后，拉普拉斯能够写出他的《宇宙体系论》(*Systême du Monde*)。万有引力定律成功地经受了各种考验，许多场合看起来是要反驳它的，却被转变成对它的有效性的出色证明。在同一时间，特别在布丰的影响下，法国化学家再次发现在物理学的吸引力与化学的亲和力之间存在着奇特的类似。不顾达兰贝尔、孔狄亚克和孔多塞(这些人的

坚定的唯理论与这些模糊的和贫乏的"类似"毫不相容)* 的冷嘲热讽，他们以相反的方向——从恒星到物质的方向踏上了牛顿的道路。

到十九世纪初，牛顿的纲领，即把一切物理化学现象归结为力(除了万有引力的吸引力以外，包括使物体膨胀和促进融解的热的排斥力，以及电力和磁力)的作用，已经变成拉普拉斯学派的正式纲领。当拿破仑统治欧洲的时候，这个学派统治了科学界。

十九世纪初叶看到了伟大的法兰西小学教育的兴起和大学的改组。这个时期科学家变成了教师和职业研究人员，并接受了培养其接班人的任务，这也是第一次试图提出一种知识综合，把它收集到教科书和通俗读物中的时期。科学不再在沙龙里讨论，它被讲授或普及。它已成为关系到职业舆论和教师权威的事情。第一次舆论的焦点是牛顿系统：在法国，布丰的信念终于战胜了欧洲启蒙运动的理性怀疑论。

牛顿在英国被神化的一个世纪之后，安培的儿子附和蒲柏的墓志铭里的话，写下了如下几行夸张的诗句：

宣告科学救世主的来临，
开普勒已驱散了凯旋门上的阴云。
于是，
圣经自此编成。
这是人的圣经，
他看到了柏拉图曾敬重的上帝，
这个人就叫做牛顿。
他来了，他揭示出最高的原则，

---

* 孔狄亚克(Condilliac，1715—1780)，法国哲学家，经济学家。孔多塞(Condocert，1743—1794)，法国哲学家。——译者

永恒、普适、惟一，就像上帝自身。

万物都肃静下来，听他说道：引力，

这个词正是那造物的字音。

在一个虽然很短却留下不可磨灭的印记的时期，科学曾是得意洋洋的。它受到一些强大国家的承认和尊敬，它被作为一个相容的世界概念的持有者而受到欢呼。由于拉普拉斯的崇拜，牛顿成了这个黄金时代的普遍象征。这是一个愉快的时刻，的确，在那时科学家们参与整个社会支持和鼓励的公共事业，不但被他们自己而且被其他人看作是进步的先驱。

今天在场论、相对论和量子力学出现以后，牛顿的综合又有何意义呢？这是一个复杂的问题，对这一问题我们将有机会回过来讨论。现在我们知道，自然界并不总是“和她自己一致和协调”的。在微观的层次上，经典力学的定律被量子力学的定律所代替；同样地，在宇观的层次上，相对论物理学代替了牛顿的物理学。但是经典物理学仍然是自然的参考点。而且我们已经把它定义为决定论的、可逆的、静态的轨道的描述，从这个意义上说，牛顿动力学仍旧可以说是物理学的核心。

当然，经典动力学的表述自牛顿以来经历了深刻的变化。这是各个时代的一些最伟大的数学家和物理学家如哈密顿和彭加勒工作的结果。简单地说，我们可以分出两个时期。首先有一个明确化和一般化的时期。在第二个时期里，经典动力学赖以成立的那些概念，比如初始条件和轨道含义等概念，已经受到了批判性的修正。这些修正甚至发生在那些(与量子力学和相对论相比之下)经典动力学保持有效的领域之中。在写作本书的时刻，即二十世纪末，我们仍然处于这第二个时期。现在

让我们转向被十九世纪科学家所发现的动力学的一般语言。(在第九章，我们将简要地叙述经典动力学在我们这个时代的复活。)

3 动力学的语言

今天经典动力学可以写成非常简洁和优美的公式。我们将看到，一个动力学系统的所有性质都可以用一个函数即哈密顿函数来概括。这个动力学的语言给出惊人的一致性和完整性。对每一个“合理”的问题，都可以给出一个毫不含糊的表述。难怪动力学的结构不但迷住而且吓呆了十八世纪以来的想象。

在动力学中，同一个系统可以从不同的角度加以研究。在经典动力学中，我们可以通过一个变换，一个变量替换，从一个观点变到另一个观点，在这个意义上，所有这些观点都是等价的。我们可以说出使动力学定律有效的各种等价的表示法，这些不同而又等价的表示法组成了动力学的一般语言。用这个语言可以使经典动力学认为它所描述的系统具有的静态性质成为明确的：对于许多种类的经典力学系统，时间看来仅仅像是一个附带的东西，因为对它们的描述能归结为对非相互作用的机械系统的描述。为了用简单的方法讨论这些重要的结果，让我们从能量守恒原理开始。

在理想的、无摩擦的、无碰撞的动力学世界中，机械效率为1，也就是说，包含该机械的这种动力学系统仅仅传递它所得到的全部运动。得到一定量的势能的某个机械(例如，压缩的弹簧，举起的重物，压缩的空气)能够产生相当于“等”量动能的运动，这动能的量正好等于为恢复这机械产生该运动时消耗的势能所需要的量。最简单的是仅仅考虑重力的情况(它适用于简单机械，如滑轮、杠杆、绞盘等等)。在这种情况下，容易建立起原因和结果之间的全面的等效关系。一个物体下落的高度 h，

完全确定了当它落下时所得到的速度。因此,一个质量为 m 的物体无论垂直下落,或沿斜面下滑,或沿着一个盘型轨道滚下,它所得到的速度(v)和动能($mv^2/2$)仅仅取决于下落的高度 h ($v=\sqrt{2gh}$),并能使该物体回到原来的高度。上升运动隐含的克服重力所做的功恢复了系统在下落时所失去的势能 mgh。另一个例子是摆,在那里动能和势能交替地由一个转变为另一个。

当然,如果取代落到地球上的物体,我们现在讨论一个相互作用的物的体系,情况就较不容易想象。不过仍然是,在每一瞬间动能的总变化恰好补偿由于系统中各点之间距离的变化而产生的势能的变化。这里,在一个孤立的系统中能量也是守恒的。

取决于质点相对位置的势能(或"势",通常用 V 表示)是这样一个一般化的量,它使得机械的制造人员能够计算一个机械由于它的空间结构发生变化而产生的运动(例如,机器某个零件的质量为 m,其高度的变化给它一个势能 mgh)。而且,势能允许我们去计算每一瞬间作用于所描述的系统不同点上的力的集合。在每一点,势能相对于空间坐标 q 的导数,量度着沿坐标方向作用于这一点的力。这样,牛顿运动定律就能不用力而用势函数作为主要的量来表述:在每一瞬间,一个质点的速度(或动量 p,即质量和速度的乘积)的变化用势能对该质点的坐标 q 的导数来量度。

在十九世纪,这个表述是通过引入一个新的函数即哈密顿函数 H 而被推广的。这个函数就是总能量,即系统的势能与动能之和。然而,这个能量不再能用通常记作 q 和 dq/dt 的位置和速度来表达,而是用所谓正则变量即坐标和动量来表达,其标准的符号是 q 和 p。在例如一个自由粒子的简单情况下,速度和动量之间有一个简单的关系($p=mdq/dt$),但是在通常情况下这个关系是比较复杂的。

一个函数，即哈密顿函数 $H(p,q)$，便完全地描述了一个系统的动力学过程。我们所有的经验知识都放进了 H 的形式之中，一旦知道了这个函数，至少在原则上我们可以解答我们可能感兴趣的一切问题。例如，坐标和动量对时间的变化可以简单地用 H 对 p 或 q 的导数给定。这个动力学的哈密顿表述是科学史上最伟大的成就之一。它逐步发展到包括电和磁的理论，它也被用在量子力学中。当然，在后者的情况下，正如我们以后将看到的，哈密顿量 H 的意义必须加以推广，这时，它不再是坐标和动量的简单函数，它变成一种新的实体，变成一个算符。(在第七章中我们将回到这个问题上来。)无论如何，哈密顿的描述在今天仍旧十分重要。通过哈密顿函数的导数给出坐标和动量随时间变化的方程就是所谓的正则方程，它们包含了全部动力学变化的一般性质。这里，我们得到了把自然数学化的胜利。经典动力学所适用的一切动力学变化都可以归结为这些简单的数学方程。

利用这些方程我们可以验证上面提到的经典动力学所隐含的一般性质。正则方程是可逆的：时间反演和速度反演在数学上是等价的。正则方程也是守恒的：用正则变量即坐标和动量表达了系统能量的哈密顿函数通过它在时间过程中所导致的变化而使自己守恒。

我们已经注意到这里存在着许多种观点或“表示”，在这些表示中运动方程的哈密顿形式是保持不变的。它们对应于坐标和动量的各种选择。基本的动力学问题之一是考查我们究竟怎样能够选择一对正则变量 q 和 p，以便得到尽可能简单的动力学描述。例如，我们可以寻找正则变量使哈密顿函数化为动能而只取决于动量(而不取决于坐标)。值得注意的是，在这种情况下动量成为运动常数。实际上，正如我们所见，根据正则方程，动量随时间的变化依赖于哈密顿函数对坐标的导数。当这一导数等于零时，动量的确成为运动常数。这与“自由粒子”系统中发生

的情形相似。通过一个表示的变换"消去"相互作用，我们就得到一个自由粒子系统，我们将把能这样作的系统定义为"可积系统"。于是，任何可积系统都可以被表为单元的集合，每一个单元孤立地变化，与所有其他单元完全无关，并处于亚里士多德认为天体所具有的永恒的和不变的运动之中(图 1)。

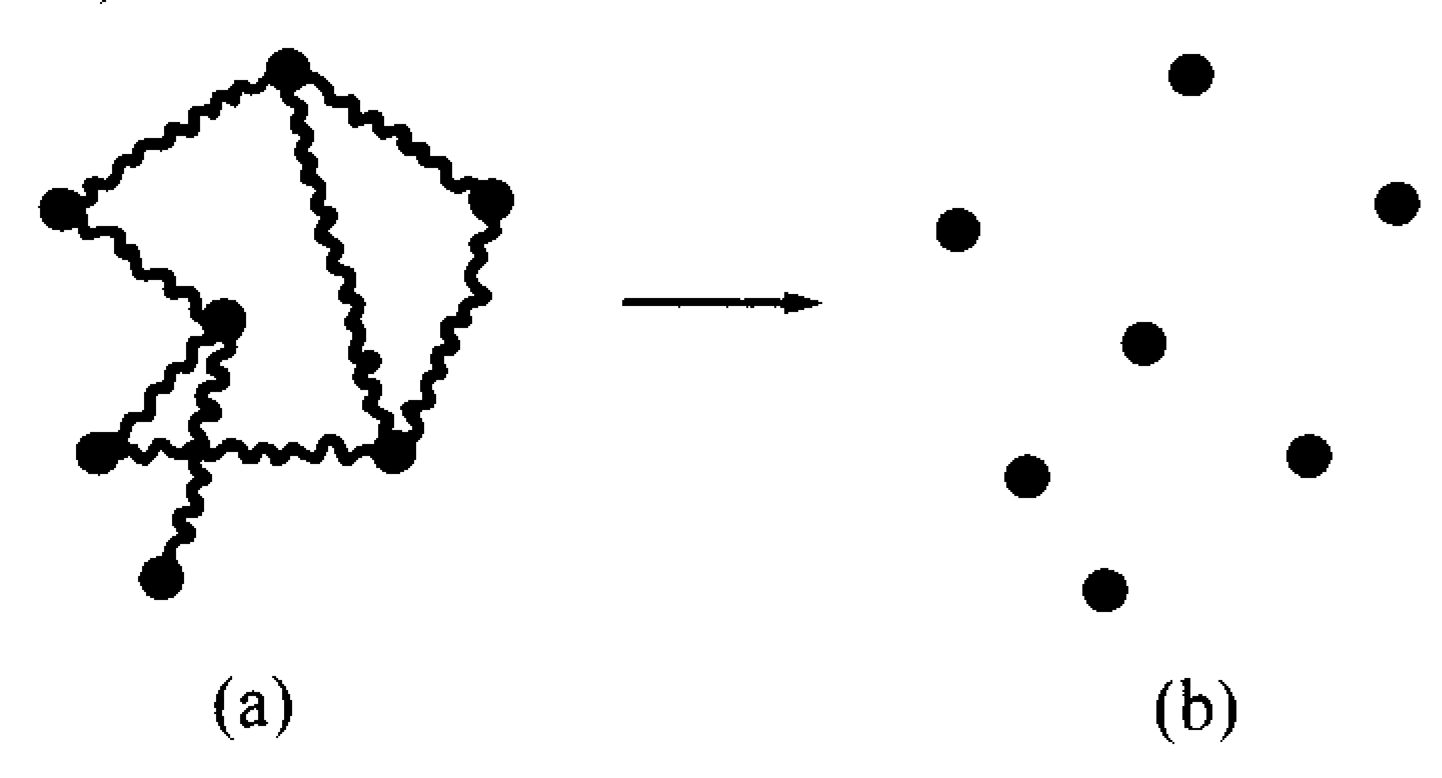


图 1 同一动力学系统的两种表示：
(a)作为相互作用着的点的集合，波纹线代表各点之间的相互作用；
(b)作为性状互不相关的点的集合。势能被消除了，它们各自的运动并不明显地依赖于它们的相对位置。

我们已经注意到在动力学中"一切都是给定的"。这意味着从最初的瞬间开始，运动的各个不变量的值就都是确定了的。没有任何事情可以"发生"或"产生"。这里，我们来到了科学史上富有戏剧性的时刻之一，这时对自然的描述几乎归结为一幅静止的图画。的确，通过变量的灵巧变换，能够把所有的相互作用消掉。人们曾经相信能简化为自由粒子的可积系统是动力学系统的原型。几代物理学家和数学家艰苦地试图为每一种系统寻求能消去相互作用的"恰当"变量。一个受到非常广泛研究的例子就是三体问题，这或许是动力学史上最重要的问题。既受地球又受太阳影响的月球的运动，就是这个问题的一例。人们作了无数次尝试去把它表述成一个可积系统的形式，直到十九世纪末，布伦斯(Bruns)和彭加勒 * 证明了这是不可能的。把世界化为没有相互作用的自

* 彭加勒(H. Poincare, 1854—1912)，又译"庞加莱"，法国数学家，理论天文学家。——译者

由单元的努力失败了。这是人们没有料到的奇事,事实上,这个意外的奇事宣告了从可积系统出发进行的对动力学的所有简单外推的结束。布伦斯和彭加勒的发现证明了动力学系统并不是同构的。简单的可积系统确实可以被约化为非相互作用的一些单元,但是一般说来相互作用是不能被消掉的。虽然这个发现在当时还了解得不那么清楚,但它暗示出,认为动力学世界是均匀的、可以约化为可积系统概念的信念死亡了。因而自然作为一个进化着的相互作用的多重世界,抵制把它约化为一个没有时间的普适图式。

与此同时,出现了一些指向同一方向的其他迹象。我们已经提到,轨道相当于决定论的定律,一旦给出了初始状态,动力学的运动定律允许计算未来或过去任一点的轨道。然而,在某些奇点上,轨道可能变成本质上不确定的。例如,一个刚性的摆可能显示出两种不同质类型的行为,即它可能围绕悬点摆动,也可能旋转。如果初始的推动刚好足以使它以零速度进入垂直位置,那么它将下落的方向,从而它的运动性质,就都是不确定的。一个无限小的扰动足以使它旋转或是振动。(这个运动的“不稳定”问题将在第九章详细地讨论。)

重要的是,麦克斯韦已经强调了这些奇点的重要性。在描述了火药棉的爆炸之后,他继续说道:

在所有这样的情形中有一个共同的事实——系统具有一定量的势能,它能够被转化为运动,但是在系统达到一定的构形之前,不能开始这一转变,获得该构形需要耗费一定的功。在某些情况下,功的耗费可能是无限小,因此通常它并不和此后所得出的能量成一定的比例。例如,岩石被风霜松开并在山边某一特定地点保持平衡,一个小小的火花点燃巨

> 大的森林，一句话引起一场世界战争，一次小小的犹豫制止一个人实现他的愿望，一个小小的孢子使所有的马铃薯枯萎，一个小的胚芽使我们成为哲学家或者白痴。在一定水平之上的所有存在都有它的奇点，水平越高，奇点就越多。在这些点上，物理量值太小以致不被有限的存在物所重视的那种影响，却可能产生出最重要的结果。由人类的努力产生的所有重大成果都取决于当那些特定状态出现时去利用它们。

由于缺少适当的数学方法去识别包含这样的奇点的系统，由于缺少化学的和生物学的知识(我们以后将看到，这些知识在今天使我们能更深刻地洞察这些奇点所起的真正本质的作用)，这个想法没有得到更进一步的详尽阐述。

尽管如此，从莱布尼兹的单子时代(见第4节的结论)起直到今天(例如玻尔模型中电子的定态，见第七章)，可积系统一直是动力学系统的典型模型，物理学家试图把实际上是极特殊的一类哈密顿方程才有的那些性质加以扩充，以便包括所有的自然过程。这是十分可以理解的。这一类可积系统是直至最近惟一被透彻地探讨过的。另外，一个能够提出所有问题的封闭系统，只要它不把这些问题规定成没有意义的，就总是和迷人的力量联系在一起。动力学是这样的一种语言，它是完备的，按定义它是和它所描述的世界共存的。动力学语言假定所有的问题，无论是简单的还是复杂的，都是彼此相似的，因为动力学语言总可以用同样的一般形式把它们提出来。这就引导人们得出这样的结论：从其解答的观点来看，所有的问题也是彼此相似的，积分过程的复杂性多些少些都不会产生什么新的东西。正是这个内在的均匀性，我们现在知道是错误的。而且，只要所有可观察量都以某种方式与运动有关，那么

机械的世界观便是可以被接受的。事实不再是如此。例如,不稳定粒子具有一个和运动有关的能量,但是这个能量还具有寿命,这是一种完全不同类型的可观察量,它与不可逆过程具有更密切的关系,我们将在第四章和第五章中论述它们。在理论科学中引入一些新的可观察量的必要性,过去是,今天仍然是使我们摆脱机械世界观的动力之一。

4 拉普拉斯妖

上述动力学描述的外推有一个标志,就是拉普拉斯所想象的小妖,它能在任意给定瞬间观察组成宇宙的部分的每一物体的位置和速度,并能推断出该物体的所有变化,无论是向着过去的还是向着未来的变化。当然,谁也不曾梦想有一天某个物理学家能从拉普拉斯妖所占有的知识那里得到什么好处。拉普拉斯自己也仅仅是利用这个编造出来的故事来说明我们的无知所达到的程度,以及对某些过程的统计描述的需要。拉普拉斯妖的疑难不是与一个对事件进程的决定论的预言是否在实际上可能的问题有关,而是与这个预言是否在原则上、在理论上可能的问题有关。这个可能性看来是蕴含在机械论的描述之中,这机械论的描述具有基于动力学定律和初始条件的二元性。

事实上,即使我们对于初始状态的无知在实践上排斥决定论预言的任何可能性,动力学系统还是被决定论的定律所支配的。这个事实使得拉普拉斯妖所看到的系统的“客观真理”可以与由于我们的无知而造成的经验局限性区分开来。在经典动力学的范围内,决定论的描述可能在实践上是不可达到的,但它仍然是确定一系列不断增加准确性的描述的极限。

在经典力学的复活中,就是这个由动力学定律和初始条件所组成

的二元性的一致性受到了挑战，这我们将在第九章中讨论。我们将看到，运动可以变得如此复杂，轨道的类型可以如此地各种各样，以致任何观察，无论其精度如何，都不能引导我们去决定确切的初始条件。但是那样一来，使这个经典力学得以构成的二元性的基础就打破了。我们只能预言一束轨道的平均行为。

近代科学在人与自然的泛灵论同盟的破裂中诞生。人类好像在亚里士多德的世界中既作为有生命的又作为有知识的生物而占有一席地位。世界是按照人的尺度造出来的。第一次实验对话从另一个同盟那里得到了这世界的社会的和哲学的部分正当理由，这另一个同盟乃是和基督徒的理性上帝的同盟。到今天为止，这个历史情况的某些含意已经持续到这样的地步：动力学已经变成并仍然成为科学的模范。

科学依然是描述从神明的或小妖的观点所看到的世界的预告。它是牛顿的科学，世界的真实面目对他除掉了面纱的新的摩西的科学，这种揭露性的科学，似乎要脱离与社会和历史的任何联系，而这社会和历史的联系却把它看作是人类社会活动的结果。这类受到激励的对话贯穿在物理学史的始终，它伴随着每个概念上的革新，伴随着每一次这样的场合：物理学似乎就要被统一起来了，而且实证主义的谨慎面具已被摘去。每一次，物理学家都重复着安培的儿子所说的如此明确的话：这个词——无论是万有引力、能、场论或基本粒子——正是那造物的字音。每一次，无论是在拉普拉斯时代，或是在十九世纪末，甚至在今天，物理学家都宣告：物理学已经到了或即将进入最后一章。只剩下一个自然能据以抵抗的最后据点了，这个最后据点的陷落将使自然界整个地无防御地被我们的知识所征服。他们就是这样无意地重复着古代的祈祷仪式，他们宣称一个新的摩西即将到来，随之而来的是科学的一次新的救世主的时代。

有的人可能要忽视这种预言家的主张，这种有些天真色彩的热情，而且毫无疑问，和自然的对话仍然继续着，伴随着对新的理论语言、新的问题和新的答案的寻求。但是我们不同意在科学家的“实际”工作和他判断、解释、指导这一工作的方法之间作出硬性的分隔。同意这一点，就会把科学约化成一种非历史的成果积累，就会忽视科学家正在寻找的东西，忽视他们努力争取的理想知识，忽视他们为什么有时会互相争吵或不能互相交流的原因。

又是爱因斯坦，他表述了近代科学神话导致的谜。他指出，这个奇迹，这个惟一真正令人惊奇的特点，就是科学毕竟存在着，就是我们找到了自然和人类思想之间的汇合。类似的情况是，在十九世纪末，当德布瓦·雷蒙(du Bois Reymond)使拉普拉斯妖成为近代科学逻辑的化身时，他补充道：“无知的人，永远无知的人。”在科学世界与认识、理解和创造该科学的思想之间的关系上，我们将总是完全无知的。

自然用一千个声音讲话，而我们仅是刚开始去听。然而，在差不多两个世纪的时间里，拉普拉斯妖折磨着我们的想象力，给我们带来一切都没意义的恶梦。假如世界真是这样的：一个小妖——一个毕竟和我们一样的存在物，掌握同样的科学但有更敏锐的感觉和更强的计算能力——能够从观察一个瞬时状态出发计算世界的未来和过去，假如在我们所能描述的简单系统与需要一个小妖来描述的更复杂的系统之间没有任何性质上的差别的话，那么，这个世界不是别的，只是一个无限的同义反复。这就是我们从我们的前辈那里继承下来的科学的挑战，我们今天必须祓除的符咒。

第三章 两种文化

1 狄德罗及其关于生命的谈话

尼斯比(Nisbet)在他论述进步思想史的一本有趣味的书中写道：

> 在近三千年内，没有任何一种思想比西方文明中的进步思想更为重要，或者和它同样重要。

对于进步思想的最有力的支持就是知识的积累。这个知识逐渐增长的壮观景象确实是人类共同努力成功的一个极好的例证。

让我们回想一下十八世纪末和十九世纪初的那些惊人的发现：关于热、电、磁和光学的理论。毫不奇怪，十八世纪就已清楚地形成的科学进步的思想统治了十九世纪。尽管如此，如我们已经指出的，科学在西方文化中的地位仍是不稳定的。这为启蒙运动高潮以来的思想史增添了一点戏剧性的色彩。

我们已经叙述过如下的选择：要么接受科学，连同那些看来与其相

反的结论；要么转到反科学的形而上学方面去。我们也强调过现代人的孤独感，即帕斯卡、克尔恺郭尔或莫诺曾描述过的孤寂。我们提到过海德格尔形而上学的反科学的含义。现在，我们想更全面地讨论一下从狄德罗、康德和黑格尔到怀特海和柏格森的西方思想史的某些方面，这些人都试图分析并限制近代科学的范围，同时开创一些看来和近代科学完全不同的新看法。今天，大家一致认为这些尝试的绝大多数已经宣告失败，很少有人会接受比如康德把世界划分为现象世界和实体世界的思想，或柏格森的“直觉”，把它看作是达到某种知识的另一条通路，而这种知识的意义将与科学所具有的意义并驾齐驱。尽管如此，这些尝试仍是我们遗产的一部分，不提及这些尝试便无法理解思想史。

我们还要简短地讨论一下科学实证主义，其思想基础是区分出什么是真理，什么是在科学的意义上有用的东西。初看上去，这个实证主义的观点似乎明确反对我们提到过的形而上学的观点，即伯林说成是“反启蒙”的观点。但是它们的基本结论却是同样的：我们必须拒绝把科学作为真正知识的基础，哪怕同时我们又承认科学在实践中的重要性，或者像实证主义者所作的那样，否认任何其他解决认识难题的可能性。

我们必须记住所有这些发展，才能理解什么是问题的关键。在什么程度上说科学是包括人类在内的自然界智能的基础?在今天，进步思想的含义是什么?

狄德罗这样一个启蒙运动的杰出人物肯定不是反科学思想的代表。相反，他对科学的信念，对知识可能性的信念，是完全彻底的。然而这正是在狄德罗以后科学不能不去认识生命的原因所在，只有在理解了生命之后，科学才能指望得出关于自然界的任何连贯一致的看法。

我们已经说过，近代科学诞生的标志是抛弃活力论的刺激，特别是抛弃亚里士多德的最终原因。不过，生命物质的组织问题仍然存在，并

且变为对经典科学的一种挑战。在牛顿胜利的高潮中，狄德罗就强调指出这个问题被物理学压制下去了。他把这个问题想象为物理学家常做的梦，这些物理学家在醒着的时候是无法考虑这问题的。物理学家达兰贝尔正在做着梦：

> “一个活的点子……不，我错了。起初什么都没有，后来有了一个活的点子。在这个活的点子上粘上另一个，又粘上另一个；这样继续不断地粘下去，便得出一个整体的东西来，因为我正是一个整体，这一点我是不会怀疑的……(说到这里，他到处乱摸了一阵)。可是这个整体是怎样造成的呢？”
>
> “请注意，哲学家，我很了解一个集合体，一个由许多细微的有感觉的东西构成的组织，可是一个动物！……一个完整的系统，它对于它的完整性是有意识的！我不了解它，不，我不了解它。”

狄德罗在想象中的与达兰贝尔的对话中，以第一人称的方式表明了机械论解释的不当之处：

> “你看见这个蛋吗？我们就是拿这个蛋来推翻一切神学学派和地球上的一切神庙的。这个蛋是什么呢？在胚芽进来以前，是一块没有感觉的东西；……这块东西是怎样过渡到另一种组织，过渡到感受性，过渡到生命的呢？依靠温度。什么东西会产生温度呢？运动。运动的一连串的结果将是什么呢？请你不要回答我，你坐下，我们用眼睛一步一步紧跟着看。起初是一个震荡的点子，然后长出一根有颜色的细丝；

然后形成了肉；然后出现了喙，翅膀尖儿，两只眼睛，两只脚爪；有一团黄黄的物质环绕着，产生出内脏；这就是一个动物。……牢狱碎了；它出来了，它走，它飞，它发怒，它逃走，它走近来，它哀鸣，它痛苦，它爱，它意欲，它享受；它有你的一切感情；你的一切动作它都做。你是不是和笛卡儿一样，主张这是一架纯粹的模仿机器？可是小孩们会讥笑你，哲学家们会答复你说，如果这是一架机器，你就是另一架机器。如果你承认动物与你之间只有机体组织上的差异，那你就表明了自己是有意识和理性的，那你就是正直的；可是人家会从这里面得出一条结论来反对你，说用一种按一定方式构成的呆板的物质，浸染上另一种呆板的物质，加上温度和运动，就得出感受性，生命，记忆，意识，欲望，思想……你想一想，就会怜悯你自己了；你就会感觉到，要想不接受一个可以说明一切的简单假定，不接受感受性这一物质的一般特性或机体组织的产物，你就是抛弃常识，就是投入神秘、矛盾和荒谬的深渊。"

与推理的力学相反，与那断定物质的本性仅仅是惯性质量和运动的主张相反，狄德罗求助于物理学的最古老的激发源泉之一，即胚胎的生长、分化和组织。形成了肉以及嘴、眼和内脏，在生物"空间"中发生着一个渐渐组织的过程，在一个表面上看来是均匀的环境中，分化出的各种形态通过各种复杂且协调的过程的效果精确地发生在恰当的时间和空间中。

一个惯性质量，甚至是一个被引力相互作用的力激活的牛顿质量，怎能成为有机的、活动的局部结构的起点呢？我们已经看到牛顿系统是

一个世界系统：物体的任何局部构形都不可能找到一个与之完全相同的东西，所有东西都不过是由一般关系连接起来的物体间的偶然近似。

但是狄德罗并没有绝望。科学还仅仅是开始，推理的力学也不过是第一个过分抽象的尝试。胚胎的奇观足以批驳其普适性的断言。这就是为什么狄德罗把像欧拉、伯努利和达兰贝尔这样的伟大“数学家”的著作比作埃及金字塔的原因，金字塔是对其建造者的天才的令人敬畏的明证，现在却是一堆无生命的废墟，孤独而寂寞。那活生生的富有成果的真正科学将被带往别的地方。

不仅如此，在他看来，似乎这个关于有机活物的新科学已经开始了。他的朋友霍尔巴赫忙于化学研究，狄德罗本人则选择了医学。化学以及医学中的问题是要用能够组织其自身且能产生生物的**活性**物质去取代惯性物质。狄德罗主张物质一定是有感觉的。组成一块石头的分子在积极地寻求某种结合而拒绝别种结合，因而它们的喜好和厌恶是受支配的。从这个意义上说，连石头也是有感觉的。于是，整个有机体的感觉就是其各部分的感觉的总和，正像一群蜜蜂，由于这只蜜蜂与那只蜜蜂间相互作用的结果，从整体上看，这群蜜蜂有着团结一致的行为。狄德罗由此得出结论：人所具有的灵魂并不比蜜蜂所具有的多。

如此看来，狄德罗对物理学以及运动普适定律所作的活力论的抗议是起源于他对任何形式的唯灵主义二元论的拒绝。必须如此地描述自然，才能使人的存在本身成为能够理解的。否则(这便是按照机械论世界观所得出的)，对自然的科学描述将遇到人作为自然的配对之物：人是一部被赋予灵魂的自动机，因而与自然是不同的。

当年狄德罗用以反对物理学的是唯物主义自然主义的双重基础：化学和医学。这个双重基础在十八世纪经常出现。一方面，生物学家们在推测关于动物机器、胚芽先存以及生物链等问题——所有这些问题

都接近于神学，另一方面，化学家和医生们不得不面对化学和生命中真实过程的复杂性。在十八世纪后期，对那些反对物理学家的“系统精灵”而赞成那种考虑自然过程多样性的科学的人来说，化学和医学是有权威性的科学。一位物理学家可能是纯粹的“精灵”，是一个早熟的孩童，但一位医生或一位化学家则必须是一个有经验的成人，他必须能解释病症，认出线索。从这种意义上说，化学和医学是艺术，它们要求判断、应用和认真的观察。化学是疯子所酷爱的感情，维耐尔(Venel)在他为狄德罗的《百科全书》所写的文章中作出了这个结论，该文雄辩地反对牛顿派的抽象的霸道，捍卫了化学。化学家和医生反对物理学家把生命过程约化为和平机制的方法及把生命过程归结为普适法则平静展开的方法，这在狄德罗时代是很平常的事。为了强调这一点，我们引用施塔尔*的卓越形象，他是活力论之父，是第一个协调化学系统学说的创始人。

按照施塔尔的说法，普适的法则只有在判定生物要死亡、要腐烂的意义上才适用于生物；组成生物的物质是如此脆弱，如此易于分解，以至于假若它单单遵守物质的普遍规律的话，它就无法逃脱在一瞬间腐烂和解体的命运。如果某个活的生物想不顾物理学的一般规律而幸存下来，哪怕它的寿命比起一块石头或另一个无生命物体来是多么短暂，它就必须在其自身之内具有一种“守恒原理”，以保持其身体的组织与结构的和谐的平衡状态。一个有生命的物体，和构成该物体的物质的极端易腐性相比，具有惊人的长寿命，这一点正好表现出某个“自然的、永恒的、内在的原理”在起作用，表现出某种特殊的原因在起作用，这种原因与那些非生命物质的规律完全不同，它与那些规律认为不可避免的不断腐败的过程经常地在抗争着。

---

* 施塔尔(G. E. Stahl, 1660—1734)，德国医生和化学家。燃素论的创始者。——译者

对于我们来说，这种对生命的分析既近又远，它与我们接近之处就在于它敏锐地认识到生命的奇异性和不稳固性。它又离我们很遥远，因为施塔尔和亚里士多德一样是用静止的方法、守恒的方法，而不是用演化或进化的方法去定义生命的。尽管如此，施塔尔所用过的术语在最近的生物学文献中仍可找到。例如，我们在这些文献中读到所谓酶和腐烂的“战斗”，以使身体摆脱死亡，摆脱按照物理学的观点是无可改变地命定的死亡。生物学的组织性在这里又一次否定自然的规律，惟一“常规”的倾向就是导致死亡(见第五章)。

事实上，只要物理学定律等同于向腐烂和无组织性的演化，那么施塔尔的活力论确实是中肯的。如今，保存在“支配”生命结构的基因信息中的一系列未必会发生的变异取代了“活力原理”。但是，从分子生物学出发的某些外推把生命归属到自然的范围之内——即作出这样的结论：生命与物理学基本定律是相容的，但这相容纯粹是偶然性的。莫诺清晰地说明了这一点：生命并不“来自物理学定律，它和这些定律相容。生命是一种我们不得不承认其奇异性的事件”。

然而，从物质到生命的过渡还可以从另一不同的角度去看待。我们将看到，在远离平衡态时，新的自组织的过程发生了。(这些问题将在第五和第六章中详细讨论。)这样，生物学的组织性便开始作为一种自然过程而出现。

但是，在得出这些新进展之前很久，关于生命的困惑问题已经发生了变化。在政治变革的欧洲，智能的风景画被改造过了，就像与反启蒙运动紧密相连的浪漫主义运动所表明的。

施塔尔批判了自动机的隐喻，因为自动机和生物不同，它的目的不是在其自身之内，它的组织性是被它的制造者强加给它的。狄德罗绝不是把对生命的研究置于科学所达的范围之外，而是把它看作代表某种

科学的未来，他认为这种科学尚处在它的婴儿时代。几年之后，这样的观点遭到了挑战。力学变化，也就是由运动定律所描述的活动，现在成了人为活动的同义语，成了死亡的同义语。与此相反，生命、自发性、自由和精神的概念都统一到一种我们现在十分熟悉的复杂体之中。和这个对立同时发生的还有另一个对立，一方面是计算和操作，另一方面是思维的自由推测活动。通过推测，哲学家达到了处于自然界核心地位的精神活动。至于科学家，他对自然的关心被归结为把自然当作一组可以操纵和可以测量的客体；因而他能占有自然，统治并控制自然，然而却不理解自然。这样一来，自然的智能性就将在科学的把握之外。

这里，我们关心的不是哲学史，而只是要强调哲学对科学的批评在这时变得更加苛刻的程度，这种批评类似于某些近代形式的反科学。问题已不再是反驳那些天真且浮浅的一般化(用狄德罗的话来说，只需大声地重复它们，就能使小孩都发笑)，而是要反驳那种产生出实验的和数学的自然知识的研究形式。科学知识受到批判并非由于它的局限性而是由于它的本质，而且基于另一研究方法的对立知识正在被宣告出世。知识被分裂成两种互相对立的研究方式。

从哲学的观点看，从狄德罗到浪漫主义，或者说得更精确一点，从这两种对待科学的批判态度的一种到另一种，这个过渡可以在康德的先验哲学中找到，其要点是康德的批判一般地把科学同牛顿的现实化等同起来。因此，任何与经典科学对立而不与科学本身对立的观点看来都是不可能的。于是，任何对牛顿物理学的批评都必须被看作是为了降低对自然的理性认识以支持一种不同形式的知识。康德的方法产生过巨大的影响，一直持续到今天。因此，让我们概括一下康德在《纯粹理性批判》一书中所表达出的观点，该书与启蒙运动的进步论观点相对立，提出了我们刚刚定义过的关于科学的封闭的、限制性的概念。

2 康德的批判的承认

上帝曾被想象为连接科学与自然的合理的要素，由于上帝的消失，智能风景画处在混乱中，怎样去恢复其中的秩序呢？当不再能(除非是以隐喻的方式)断言科学解释了造物的词语时，科学家还可能去接近全局性的真理吗？上帝现在沉默了，至少是不再说人类理性所说的同样语言了。而且，在一个取消了时间的自然界里，我们的主观经验还剩下些什么呢？自由、命运、伦理价值的意义是什么呢？

康德论证道，有两个层次的现实：一个是现象的层次，它对应着科学；另一个是实体的层次，它对应着伦理学。现象的秩序是人的思维创造出来的。实体层次超越了人的智能，它对应着一种支持人的伦理与宗教生活的精神的现实。从某种角度看，康德的结论对于那些既肯定伦理的现实又肯定经典科学所表达出的客观世界的现实的人来说是惟一可能的结论。人类自己现在代替了上帝，成了他在自然界中感到的秩序的根源。康德主张科学知识是对的，同时人类与科学所描述的现象世界的疏远也是对的。按照这个观点，我们可以看出，康德的哲学明确地表达了经典科学的哲学内容。

康德把批判哲学的主题定义成是先验的。它不关心经验的对象，而是立足于一个先验的事实，即关于这些对象的一种系统的知识是有可能的(对于康德而言，这一点已由物理学的存在而得到证实)，继而要说明使这种知识成为可能的那些先验的条件。

为了做到这些，就必须分清我们从外部世界所得到的直接感觉和客观上的、“合理”形式的知识。客观知识并不是被动的，它构成它的对象。当我们把某一现象当作是经验的对象时，我们在实际经历该现象之前先验地假定它遵守着一组给定的原则。只要我们把它当作一种可能

的知识对象而感知,它就成为我们思维的综合活动的产物。我们发现我们自己也在我们知识的对象当中,因而科学家本身就是他在自然界中发现的那些普适规律的根源。

经验的先验条件也就是经验对象存在的条件。这个著名的论述概括了康德的“先验”研究所达到的“哥白尼革命”。主体不再围绕着它的客体“旋转”,它要去发现它受到其摆布的那些法则,或者使它能被阐明的那种语言。现在主体本身处于中心,施行它的法则,而感知到的世界在说着主体的语言。这样一来,牛顿科学能够从一个外部的近于神灵的地位去描述世界就毫不奇怪了。

所有感知到的现象都被我们头脑中的那些规律所支配,这并非意味着关于这些对象的某种具体的知识是无用的。按照康德的说法,科学并不是同自然进行对话,而是把自己的语言强加于自然。尽管如此,它还必须在各个场合找出用这个一般语言所表达出的具体信息。只有那关于先验概念的知识是虚浮和空洞的。

按照康德的观点,拉普拉斯的小妖,即科学神话的符号,就是一种幻象,不过,是一种合理的幻象。尽管它是某种局限性处理的结果,而且这是不合理的,但它仍表达了作为科学的驱动力的一种合理的信念,即相信自然在整体上恰好服从那些科学家成功地阐明的规律。无论走到哪里,无论提出什么问题,科学总是至少能得到同样的答案,如果不是同一个答案的话。存在着一种普适的句法,它包括一切可能的答案。

这样,先验哲学承认了物理学家的声明:他们已经找到了所有实在知识的确定形式。但是与此同时,先验哲学还为哲学夺得了对于科学的统治地位。再也没有必要去寻找科学活动成果的哲学意义了。从先验的立场出发,这些成果不会导致任何真正新的东西,哲学的主体是科学,

而不是科学的成果。把科学当作一种反复进行的封闭的事业,便为先验的反映提供了一个稳定的基础。

因此,康德的批判哲学在承认所有的科学主张的同时,实际上把科学活动局限在一些可被认为是既容易又无益的问题上。它把科学说成是翻译单调的现象语言的枯燥工作,同时给它自己留下了如下一些人类“命运”的问题:人能知道些什么,人必须做些什么,人可以希望些什么。科学所研究的世界,实在知识能够接近的世界,是“惟一”的现象世界。不仅科学家不能在事物本身中去认识它们,而且甚至科学家所提的问题也与人类的现实问题无关。美丽、自由和伦理不能成为实在知识的对象,它们属于实体世界,属于哲学的领域,它们与现象世界毫无关系。

我们可以接受康德的出发点,即他对人在科学描述中所起的积极作用的强调。我们已经说过很多,实验是一种艺术,它要选择一些假定被待研究的规律所支配的情况,并迫使它们给出一些清楚的实验答案。对于每一个实验,一些原则被事先假定出来,因此这些原则不可能被该实验确立。但我们已经看到,康德走得更远得多。他否认可能会有的科学观点的多样性,否认事先假定的原则的多样性。和经典科学的神话一样,康德追求科学解释自然的惟一语言,追求物理学所依据的因而和人的认识同类的惟一的一组先验原理。因此,康德否认科学家积极选择的必要性,否认选择某种研究情况的必要性。这种研究情况对应着一种特殊的理论语言,用该语言可以提出一些确定的问题并寻求实验的答案。

康德的批判的承认把科学努力定义为无声的,系统的,封闭在自身之中的。这样做的结果是,哲学支持了这个裂缝,并使之永恒,它贬低并放弃了实在知识的整个领域,把它交给科学,与此同时却为它自己保留下自由和伦理学的领域,这些被想象成与自然界完全不同。

3 自然哲学?黑格尔和柏格森

由康德得出的科学与哲学间的休战是个脆弱的休战。康德之后的哲学家们打破了这个休战,他们支持一种新的科学哲学,假定了一种获取知识的新途径,这种途径与科学的途径不同,且在实际上与科学的途径相反。从一切实验对话的束缚下释放出来的推测方法占有最高统治地位,为科学家与哲学家之间的对话带来了灾难性的后果。对大多数科学家来说,自然哲学变成了蹂躏事实的骄傲自大、荒谬绝伦的推测的同义语,且被事实不断地证明的确是错的。另一方面,对大多数哲学家来说,它变成了在处理自然以及与科学对抗时所包含的危险的一种符号。因此,自然科学、哲学与人文科学研究之间的裂痕,由于彼此蔑视和恐惧而变得更大了。

作为这种研究自然时的推测方法的一个例子,让我们首先考虑黑格尔。黑格尔的哲学具有宇宙的尺度,在他的体系中,越来越多的复杂性层次被详细地说明,且自然的目的就是其精神元素的最终自我实现。自然史的实践伴随着人的出现,亦即伴随着理解自身的上帝的到来。

黑格尔的自然哲学系统地吸收了牛顿科学所否认的一切。尤其是,它盯住了在力学所描述的简单行为与像生物那样的复杂实体的行为之间的质的差别。它否认约化这种种层次的可能性,拒绝认为差别仅在表面的思想,拒绝认为自然基本上是均匀和简单的那种思想。它肯定存在着一种层次结构,其中的每一个层次都以其前面的一些层次为先决条件。

黑格尔与牛顿派的《物质的故事》的作者们、那些包括全世界的、范围从引力相互作用到人类感情的全景图画的作者们不同,他十分清楚

地知道他的各个层次(我们可以提出一种和黑格尔自己的解释相差很远的看法,即认为这些层次对应着自然界中不断增长着的复杂性的思想,对应着某种时间概念,其意义在每个新的层次上都更加丰富)之间的区别与他那时代的数学的自然科学是互相冲突的。因此他要限制该科学的意义,要证明数学描述被限制在最平凡的情形。力学可以数学化就是因为它仅把时空的属性赋予给了物质。“砖石本身并不能把人砸死,而是只有通过获得的速度,才会产生这个结果。这就是说,人是被空间和时间砸死的。”人是被我们称为动能($mv^2/2$)的东西打死的,也就是被一种抽象的量打死的。这种抽象的量把质量和速度定义为是可以互换的,减小一个而增大另一个可以得到同样的杀人效果。

被黑格尔当作数学化的条件的正是这个可互换性,当力学的描述层次被一个“更高级”的层次(它涉及更大范围的物理属性)所取代时,黑格尔的数学化的条件就不再满足了。

从某种意义上说,黑格尔的体系对有关时间和复杂性的要害问题给出了一个谐调的哲学响应。不过,在几代科学家看来,它代表了憎恶和蔑视的一个缩影。在几年中,黑格尔的自然哲学所固有的困难因其体系所依据的科学背景被废弃而加剧,因为黑格尔当然是把他对牛顿体系的拒绝基于他那时代的一些科学概念的。而正是这些概念以令人吃惊的速度被废弃了。要为经典科学的替身去寻找实验上的或理论上的支持,最不好的时机莫过于十九世纪初了。虽然标志这段时间的特点的是科学实验范围的惊人扩展(见第四章)和似乎与牛顿科学对立的各种理论的激增,但是,这些理论的多数在其诞生后的几年内就不得不被放弃。

在十九世纪末,当柏格森着手寻找他那时代的科学的一种可被接受的替身时,他转向了直觉,把它看作是推测知识的一种形式,不过他

把它说成是和浪漫主义形式完全不同的。他清楚地阐明,直觉不能产生某种体系,只能产生一些永远是部分的和不能一般化的结果,一些需要十分谨慎地去表达的结果。与此相对,一般化却是“智能”的一种属性,其最伟大的成果就是经典科学。柏格森式的直觉是一种专心致志的注意,一种越来越困难的更深入地探究事物的奇异性的尝试。当然,为了进行交流,直觉就必须诉诸语言——“为了要传播出去,它必将把思想用作一种传播的工具。”要做到这一点,必须无限地耐心和周密,同时要累积映像和比较以便“抓住现实性”,并由此用一种越来越精确的方法推测出那些用普通术语和抽象思想所无法进行交流的东西。

科学与直觉的形而上学“是同样精密和确定的,或者能够变成同样精密和确定的。这两者都与现实本身有关。但是这两者的每一个都只保持现实的一半,以致人们如果愿意的话,可以看到在它们当中有科学的两个细类或形而上学的两个分部,假若它们没有标记出思想活性的相反指向”。

这两种相反方向的确定还可以看成是科学进化的历史后果。对柏格森来说,这不再是寻找他的时代的物理学的科学替身的问题。在他看来,化学和生物学已经坚定地选择力学作为它们的模特儿。狄德罗对化学和医学的未来所抱的希望由此而成为泡影。按照柏格森的看法,科学是一个整体,因此必须当作一个整体来加以评判。当他把科学说成是某个实际智能(它的目的在于统治物质,它通过抽象和一般化来开发出一些为达到统治物质的目的所必需的知识类别)的产物时,他就是这样做的。科学是我们需要利用世界以维持生命的产物,科学的概念是由操纵对象、作出预言和获得能重复的活动的需要所决定的。这就是为什么理性力学代表科学的真谛、代表其实际体现的理由。其他的科学都是一种

方法的更为模糊、笨拙的表现，这种方法当它所探索的领域越是缺乏活力和组织性时就越是成功。

对柏格森来说，所有科学理性的局限性都可以约化为一个有决定意义的局限性，这就是：它不能理解持续过程，因为它把时间约化成由某个决定论的定律连接起来的若干瞬时状态的一个序列。

“时间是编造之物，或者它什么都不是。”自然就是变化，就是新事物的不断的精心制作，就是在一个没有任何事先建立的模式的本质上是开放的发展过程中被创造的整体。“生命是在时间中进步和维持的。”这个进步中惟一能被智能所把握的部分就是这样的东西：智能成功地固定于可控制和可计算元素的形式之中，并且参照于一种被看作是一系列真正并列瞬间的时间。

> 因此，物理学“被限于把组成这一时间的诸事件与运动物体T在其轨道上的诸位置之间的同时性耦合起来。物理学把这些事件从整体中分开，而这整体在每个时刻都有某种新的形式，且和这些事件交流其新特性中的某些东西。物理学用抽象的方法考虑这些事件，比如说这些事件位于活的整体之外，也就是说它们处于某种在空间中展开的时间之中。物理学只保留这样的一些事件或事件系统，它们能如此地被孤立出来而不必经受太大的变形，因为只有这些才适用于物理学的方法。我们的物理学的历史正是从认识到怎样孤立出这样的系统时开始的”。

在理解持续过程本身的时候，科学是无能为力的。这时需要的是直觉，即“通过思维所得出的直接想象”。“纯粹的变化，真实的持续，是精

神上的东西。直觉是获得精神、持续和纯粹变化的东西。”

我们能不能说柏格森和后康德的自然哲学同样地失败了呢？形而上学没有在他想建立的直觉的基础上得以实现，就此而言，他失败了。在另一个方面他没有失败，他和黑格尔不同，他有幸去对科学(即经典科学，它在整体上已经稳固地建立起来并达到其神圣之理想)作出评价，从而鉴别出那些对我们来说依然是问题的问题。不过，和后康德的批判一样，他把他当时的科学与一般的科学视为等同。因此，他认为科学具有“法理”上的局限性，而这些局限性只是“事实”上的。于是，他试图一劳永逸地为科学的各个领域以及其他智能活动规定出一个“现状”来。这样一来，留给他的惟一出路就是引进一种方法，在其中，彼此对立的研究方法顶多也只是能够共存而已。

最后，即使柏格森借以概括经典科学成就的那种方法在某种程度上依然是可以接受的，我们也不再认为这种方法说明了科学事业的局限性是永恒的。我们觉得这种方法更像是一个纲领，它正开始被科学正在经受的变形所实现。特别是，我们知道，和运动相连的时间并非占有物理学中时间的全部意义。因此，柏格森所批判的局限性正在开始被克服，克服的方法不是抛弃科学研究或抽象思维，而是察觉出经典动力学概念的局限性，并去发现新的适合于更一般场合的表述。

4　过程和实在：怀特海

我们已经强调，康德、黑格尔和柏格森的共同之处就是寻求一种达到实在的道路，这条道路与经典科学的道路不同。这同样也是怀特海哲学的基本目标，怀特海的哲学肯定是前康德的哲学。在他最重要的著作《过程和实在》(*Process and Reality*)中，他把我们推回

去接触经典时代的一些伟大的哲学，以及它们对严密的概念实验的寻求。

怀特海想把人类的经验理解为一种属于自然界的过程，就像物理存在那样。这种想法使得他一方面拒绝哲学的传统，即用意识、思想和感觉去定义主观经验的传统；另一方面，用欣赏、感情、冲动、嗜好和愿望去想象所有的物理存在，也就是说，和在十七世纪诞生的他所谓的"科学唯物论"交战。因此，怀特海也像柏格森那样指出了十七世纪科学所开拓的理论图式的基本弱点：

十七世纪终于产生了一种由数学家所构成又为数学家所使用的科学思想的图式。数学思维的伟大特点在于它能够进行抽象，且能从抽象中引出明确的令人信服的一连串的推理，只要你想思考的是那些抽象，这些推理就是完全令人满意的。科学抽象一方面得出了物质及其在空间和时间中的简单位置，另一方面得出了思维，能够感知、忍受、推理，但不抵触的思维。科学抽象的这些巨大成功给哲学强加了一个任务，即承认抽象是事实的最具体的反映。

因此，近代哲学被毁灭了。它以一种复杂的方式在三个极端之间摆动。一个极端是二元论者，他们认为物质和思维平起平坐。另两个极端是两种不同的一元论者，一种把思维放在物质之内，另一种把物质放在思维之内。但是，用抽象作成的这个把戏决不能克服由于把误放的具体性归因于十七世纪科学图式而带来的固有混乱。

然而，怀特海认为这情况只是暂时的，科学决不会永作混乱的

俘虏。

我们已经提出了这样的问题:是否有可能表述一种自然哲学,使它不与科学相对立? 怀特海的宇宙学就是在这方面的最为雄心勃勃的尝试。怀特海看出科学与哲学之间没有根本的矛盾。他的目的在于规定出概念的领域,使人类经验和物理过程的问题在该领域内能得到一致的处理。他的目的还在于确定该问题得以解决的条件。必须做的工作是表述一些原则,以便勾画出各种存在形式(从石头的存在形式到人的存在形式)的特点。在怀特海看来,正是这个普适性把他所从事的工作定义为"哲学"。每一个科学定理都从世界的复杂性中选择并抽象出某一组特殊的关系来,但是哲学不能偏爱人类经验的任一特殊领域。通过概念实验,哲学一定要造出一种一致性来,这种一致性可以容纳经验的各个方面,不论它们属于物理学、生理学、心理学、生物学、伦理学等等。

怀特海也许比其他任何人都更敏锐地认识到,假如组成自然的各个成员均被定义成永恒的、单个的实体,它们在一切变化和相互作用中都保持它们的同一性,那么就不可能想象出自然界的有创造力的演变。但是,他也认识到,要使一切永恒成为虚幻的,要以演化的名义否认存在,要拒绝实体而支持连续的和不断变化的流,就意味着再一次堕入永远为哲学所布设的陷阱——去"沉湎于辩解的业绩"。

于是,在怀特海看来,哲学的任务就是对永恒和变化进行调和,就是把事物想象为过程,就是去证明演化组成实体,组成一个个诞生着和死亡着的本体。详细论述怀特海的体系将超出本书的范围,让我们仅强调一下,他证明了一种关系的哲学(没有任何自然元素永恒地支持变化着的关系,每个元素都从它与其他元素的关系中得到其本体)和一种创新演化的哲学之间的联系。每个存在物在其创造的过程中都使世界的

多重性得到统一,因为它为这个多重性又加上一组新的关系。每个新实体被创生时,“多数实体变成了一个实体,且这多数实体又增加了一个实体”。

在本书的结论中,我们将再次讨论怀特海的关于永恒与变化的问题,那时是从物理学提出的。我们将说到由其与世界的不可逆的相互作用所形成的实体。今天,物理学已经发现,有必要既肯定单元和关系之间的区别,又肯定它们之间的相互依存。如今,物理学已经认识到,要使一个相互作用成为真正的,有关事物的“本性”必须从这些关系中导出,而与此同时,这些关系必须从这些事物的“本性”中导出(见第十章)。这就是例如基本粒子物理学中的“靴袢”原理(该原理断言了所有粒子的普遍联系)所表达的那种“自一致”描述的先驱。不过,在怀特海写作《过程和实在》这本书的时候,物理学的形势还是很不同的,怀特海的哲学仅仅在生物学中找到了一个反响。

怀特海的例子也和柏格森的例子一样使我们相信,只有一种科学的开放,科学的扩展,才能结束科学与哲学之间的两分局面。仅当我们修正我们的时间概念时,这个科学的扩展才是可能的。否定时间(就是说,把时间归结为只是某个可逆定律的展开)就是放弃定义一种自然概念的可能性,这种自然概念和那种认为自然生出生物、尤其是人的假设是一致的。它使我们必须在一种反科学的哲学和一种隔离性的科学之间作出选择。

5 “无知的人,永远无知的人”:实证主义者的口吻

克服经典科学中蕴含的经典理性的困难的另一种办法是把科学上最富成果的东西同“真”的东西区分开。这是另一种康德式的分裂。

基尔霍夫*在1865年发表的《论自然科学的目标》(*On the Goal of the Natural Sciences*)中说道,科学的最终目标是把一切现象归结为运动,而这运动本身又是被理论力学所描述的。亥姆霍兹也作过类似的陈述,他是一位化学家、医生、物理学家和生理学家,他在德国的一些大学成为欧洲科学中心的时代统治着这些大学。他说道:“自然现象要被归结为具有不变的动力的质点的运动,这些动力只取决于空间状态。”

于是,自然科学的目的便是要把一切观察结果归结为牛顿所表述的且被拉格朗日、哈密顿等著名物理学家和数学家所扩充了的一些定律。我们姑且不去问为什么这些力能存在并进入了牛顿的方程。无论如何,我们不能“理解”物质或力,即使我们应用这些概念表述了动力学的定律。这个问题,即力和质量的基本性质,对我们依然是隐匿着的。我们已经提到过,德布瓦·雷蒙简捷地表达出我们知识的局限性:“无知的人,永远无知的人。”科学没有提供任何方法去揭开宇宙的神秘。那么,科学是什么呢?

我们已经提到过马赫的具有影响的观点:科学是达尔文的生存斗争的一部分。科学帮助我们去组织我们的经验。它导致一种思想的节省。数学定律不是别的,只是一些惯例,供我们用来概括可能实验的结果。在十九世纪末,科学实证主义引起了知识界的极大兴趣。在法国,它影响了迪昂**和彭加勒这样一些杰出思想家的工作。

在消除“该受责备的形而上学”中再多走一步,我们便遇到了维也纳学派。这里,科学被授予裁决一切实证知识以及保持这实证知识有效所需的哲学的权力。这就是说,使所有理性知识和问题都合理地服从于

---

* 基尔霍夫(G. R. Kirchhoff, 1824—1887),德国物理学家。提出基尔霍夫辐射定律,创立光谱化学分析法。——译者

** 迪昂(P. Duhem, 1861—1916),法国物理学家,数学家,科学哲学家。——译者

科学。名声显赫的新实证主义哲学家莱辛巴赫(Reichenbach)在一本论述“时间的方向”的书中写道：

> 除了通过物理学以外，没有别的道路能解决时间的问题。物理学和别的科学不同，它已过问时间的本性。如果时间是客观的，物理学家一定已经发现这个事实。假如有什么演化，物理学家一定知道它。但是，假如时间只是主观的东西且存在是无时间性的，那么物理学家一定能在其现实性的构成中忽略时间，并且不需借助于时间就能描述世界……。要寻求时间的本性而不去研究物理学，是无望的事情。如果有一个关于时间的哲学问题的解答，那么它是写在数学物理方程中的。

莱辛巴赫的著作使任何想看到物理学需对时间这个题目说些什么的人感到很大兴趣，但是，它并非是论述自然哲学的一本书，而只是记述了时间的问题如何在向科学家挑战而不是向哲学家挑战。

那么，哲学的作用是什么呢?人们常说，哲学应当成为科学的科学。于是哲学的目标便是分析科学方法，把所用的概念公理化并清晰地表述出来。这样的作用将使以前的“科学皇后”似乎成为科学的女仆。当然，有这种可能性：概念的这种清晰表述将使更加进步成为可能，被这样理解的哲学将通过其他方法——逻辑学、语义学——产生出能与科学本身的知识相比的新知识。正是这种希望使得“分析哲学”能在英美圈中如此流行。我们不想缩小这种探讨的益处，但是我们这里关心的问题却大不相同。我们的目标不在于阐明已有的知识或把它公理化，而是要填平这种知识中的某些基本鸿沟。

6 新的开端

在本书的第一部分，我们一方面描述了由于经典科学而成为可能的与自然的对话,另一方面叙述了科学在文化中的不稳定的地位。有没有出路呢?在本章中,我们讨论了寻找其他知识道路的几种尝试。我们也考虑了把科学从现实中隔离出来的实证主义观点。

在科学会议上最令人激动的时刻经常是发生在科学家们讨论这样一些问题的时候,这些问题看来似乎没有任何实用性,没有什么生存的价值——例如对量子力学作出某些可能的解释，或者是这个膨胀着的宇宙在我们的时间概念中所起的作用。假如我们接受了实证主义观点(它把科学归结为一种符号的微积分),科学就会大大失去其吸引力。牛顿在理论概念与实际知识间所作的综合就会被打碎。我们就会携带着在技术的实践知识与理论知识之间不可逾越的鸿沟，回到古希腊和罗马时代的形势中去。

在古代人看来,大自然就是智慧的源泉。在中世纪,大自然被说成是上帝。在近代,大自然已经变得如此沉默寡言,以致康德认为科学与智慧、科学与真理应是完全隔开的。在过去的两个世纪内,我们就是伴随着这个两分局面而生活的。现在应是结束这种局面的时候了。就科学而言,这样做的时机已趋于成熟。从我们现今的观点来看,走向可能重新统一知识的第一步,就是十九世纪对热的理论的发现,即对热力学几个定律的发现。热力学看来是“复杂性科学”的第一种形式。正是这种科学我们现在要进行描述,从它的形成到最近的发展。

第二编

复杂性的科学

第四章　能量和工业时代

1　热——引力的竞争者

“火改变着物质。”古老的知识一直把化学和“火的科学”连在一起。在十八世纪，火渐渐成了实验科学的一部分，它引起了一个概念上的变化，即强迫科学去重新考虑过去被以机械论世界观的名义排斥在外的东西，比如不可逆性和复杂性等课题。

火改变着物质；火引起化学反应，引起如熔化和蒸发这样一些过程。火使燃料燃烧并放出热。十九世纪的科学跳出了所有这些常识，把注意力集中到一个事实上，即燃烧产生热，且热可以引起体积的增加，因而燃烧可以作功。于是，火引来了一种新型的机器——热机，工业社会就建立在热机这个技术发明的基础之上。

有趣的是，当亚当·斯密写作他的《国富论》并收集有关工业生产的前景和决定因素的资料时，就在同一所大学里，詹姆斯·瓦特正在对他的蒸汽机作最后的改进。不过，亚当·斯密所能找到的煤的惟一用途就是供工人取暖。在十八世纪，风力、水力和畜力，以及它们推动的一些

简单机器，仍然是仅有的几种能够想象出来的动力之源。

英国的蒸汽机的迅速推广引起了研究热的机械效应的新兴趣，因此，诞生于这种兴趣之中的热力学不大关心热的本性，而主要关心热产生"机械能"的可能性。

至于"复杂性的科学"之诞生，我们认为是在1811年，即伊泽尔的行政长官让-约瑟夫·傅里叶* 男爵因其对固体中热传播的数学描述而获得法国科学院奖金的那一年。

傅里叶所叙述的结果惊人地简单和精巧：热流与温度的梯度成正比。值得指出的是，这个简单的定律适用于各种物质，无论是固态的，液态的，还是气态的。此外，无论物体的化学成分是什么，无论它是铁还是金，这个定律都同样有效。只有热流与温度梯度的比例系数随着每种物质而不同。

显然，傅里叶定律的普适的特点并不能直接地和牛顿定律所表达的动力学相互作用联系起来，因此，傅里叶定律的表述可以被认为是某个新型科学的起点。的确，傅里叶对热传播的数学描述的简单性，与从分子论观点看到的物质的复杂性成了鲜明的对照。固体，气体，或液体，它们是由大量的分子所组成的宏观系统，然而导热性却由一个简单定律描述。傅里叶表述他的结果时，正是拉普拉斯学派统治欧洲科学的时候。拉普拉斯、拉格朗日和他们的门生徒劳地联合起来，竭力批评傅里叶的理论，但他们不得不败下阵来。拉普拉斯的美梦在其荣耀的顶峰遇到了第一次挫折。一种物理理论已被创立出来，其每个细节都像运动的力学定律一样具有数学的严谨性，但这种理论和牛顿的世界完全不同。从这时起，数学、物理学与牛顿科学不再

* 傅里叶(J. Fourier, 1768—1830)，一译"富里埃"，法国数学家、物理学家，用数学方法研究热传导理论。——译者

是同义语了。

热传导定律的表述具有持续的影响。奇怪的是,在法国和英国,它是通往我们时代的不同历史道路的起点。

在法国,拉普拉斯美梦的失败导致了对科学的实证主义的分类,这种分类是由奥古斯特·孔德引入的,它把科学分成一些完全确定的类别。孔德对科学的划分已被米歇尔·塞利(Michel Serrès)很好地分析过了——物理学中共存着两个普遍的东西,热和引力。说得更严重一点,如孔德后来所表述的,这二者是互相敌对的。引力作用于某个惯性质量,该质量承受引力,这时它只受到它所得到的或所传递的运动的影响,而不受任何其他影响。热却改变物质,决定物态的变化,并引起内部性质的变化。从某种意义上说,这就肯定了十八世纪反牛顿的化学家以及所有强调质量所具有的纯时空状态与物质的特殊活性间之差别的人所作出的断言。这个差别曾被用作对科学进行分类的一种基础,孔德就把所有的科学都放在有序即平衡的共同符号之下。实证主义者进行分类时,简单地把热平衡的概念添加在各种力之间的机械平衡之上。

另一方面,在英国,热传播的理论并非意味着放弃对统一知识各领域所作的尝试,而是开创了一条新的研究路线,即不可逆过程理论的渐次表述。

当把傅里叶定律用于一个具有非均匀温度分布的孤立物体时,该定律描述了逐步实现的热平衡。热传播的作用是使温度的分布逐渐均匀,直到完全均匀。谁都知道这是一个不可逆的过程;一个世纪以前,博尔哈夫(Boerhave)已经强调指出,热永远在扩散且趋向平均。因此,复杂现象(包括大量粒子的相互作用)的科学从一开始便和时间非对称性的发生连在一起。但是,在热传导被首先与从工程的观点看待的耗散观念联系起来之前,并没有成为研究不可逆性本质的起点。

让我们详细叙述一下在十九世纪早期定型的新“热学”的结构。热学也像力学一样，既含有该物理客体的原始概念，也含有对机器或引擎的定义——这就是在产生机械功这个特定方式下原因和结果的同一。

研究包含热的物理过程，必须定义一个系统，这并不是像在动力学中那样由该系统各部分的位置和速度去定义(在1立方厘米体积的气体或固体中有差不多10^{23}个分子)，而是由一组宏观参数如温度、压力、体积等去定义。此外，我们还必须考虑描述该系统与环境之关系的边界条件。

例如，让我们考虑一下比热，这是宏观系统的特征属性之一。比热就是当体积或压力保持不变时使系统温度提高一度所需热量的度量。为了研究比热(比如说定容比热)，必须使系统与环境发生相互作用；系统必须得到一定的热量，与此同时，其体积保持不变，压力可以变化。

更一般地讲，一个系统可以处于机械作用(例如使用一个活塞装置可以使压力或体积保持不变)、热作用(可以给系统一定的热量或从系统产生一定的热量，或者系统本身可以通过热交换而达到某一给定的温度)或化学作用(在系统与环境之间产生一个反应物与反应生成物的流)之下。我们已经提到，压力、体积、化学组成和温度，都是经典的物理化学参量，用这些参量可以确定宏观系统的性质。热力学就是这些性质的变化之间的关联的科学。因此，与动力学的对象相对，热力学的对象引出一种新的观点。该理论的目标不是借助于粒子间的相互作用来预言系统中的变化，而是预言当我们从外部对该系统施加一些改变时该系统将怎样作出反应。

一个力学的机械以功的形式偿还它从外部世界所获得的势能。原因和结果具有相同的本质，且至少在理想上是等价的。反之，热机却隐含着物质状态的变化，包括改变系统的机械性质、扩张和膨胀。所做的机械功必须被看作是某个真正变化过程的结果，而不仅仅被看作是一

种运动的传递。于是,热机不仅是一种被动的装置;严格地说,它产生运动。这就是一种新问题的开始:为了恢复系统产生运动的能力,系统必须能回到其初始状态。因此,就需要第二过程,即第二个状态变化,以补偿因产生运动而发生的变化。在热机中,这个和第一过程相反的第二过程包含对系统的冷却,直到系统重新得到其初始的温度、压力和体积。

热机的效率问题,即所做的功和为产生两个互相补偿的过程而必须向该系统提供的热量之比的问题,正是使不可逆过程的概念引进到物理学中去的关键。我们将在有关的地方再回来讲述傅里叶定律在此关系中的重要意义。让我们先来描述能量守恒原理所起的主要作用。

2 能量守恒原理

我们已经强调过能量在经典动力学中所处的中心位置。哈密顿量(即动能与势能之和)是用正则变量——坐标和动量——标出的,且导致这些变量的变化。与此同时,哈密顿量本身却在整个运动过程中保持不变。动力学变化只能改变势能和动能各自所占的比重,同时维持着它们的总和不变。

十九世纪初是以前所未有的实验活动为特征的。物理学家认识到,运动不仅是引起空间中物体相对位置的变化而已。在实验室中识别出来的许多新过程渐渐组成了一个网络,最终把所有这些物理学新领域与另一些更加传统的分支比如力学联系起来。这些联系之一是伽伐尼在偶然中发现的。在他以前,人们只知道静电荷。伽伐尼利用一只青蛙首次得出了实验电流。伏打很快认识到青蛙的“伽伐尼”收缩实际上就是流过蛙体的电流的效应。1800年,伏打制成了一个化学电池,由此,电可以由化学反应来产生了。随后而来的是电解:电流可以改变化学亲和

力且产生化学反应。但这个电流也能产生光和热；且在1820年，奥斯特发现了电流产生的磁效应。1822年，西贝克证明了，热反过来也能产生电，1834年他又说明了怎样能用电来冷却物质。1831年法拉第利用磁效应产生感应电流。新效应的一个完整网络渐渐被揭露出来。科学的视野以一种前所未有的速度在扩展。

1847年，焦耳迈出了决定性的一步：他把化学、热学、电学、磁学和生物学之间的联系看作是一种“转换”。假设有“某种东西”在数量上保持不变，同时它却在性质上发生了变化，这就是转换的思想，这种思想把原来在机械运动中发生的事情推广了。如我们已经看到的那样，总的能量是守恒的，与此同时势能被转换为动能，或是动能被转换为势能。焦耳为物理化学变化定义一个一般的当量，由此便可以测量出那个守恒的量。这个量后来就成为众所周知的“能量”。他测量出为使一定量的水的温度提高一度所需要的机械功，从而得出第一个当量关系。在令人困惑的众多新发现当中，一个统一的因素被发现出来。贯穿于物理、化学和生物系统所经历的各种各样的变化之中的能量守恒为这些新过程的解释提供了一个指导性的原则。

毫无疑问，能量守恒原理对十九世纪的物理学家来说是至为重要的。在他们中的许多人看来，这一原理意味着整个自然界的统一。焦耳在一篇英文著作中表达了这一信念：

> 的确，自然界的现象，无论是力学的、化学的，还是生命的现象，几乎全部处于通过空间的引力、活力(请注意，即动能)与热之间不断的相互转换之中。因此，在宇宙中维持着的就是这种秩序——任何东西也不会被扰乱，任何东西也不会丢失，但整个机器(尽管它是如此复杂)却平滑、和

谐地运转着。而且尽管如伊齐基尔(Ezekiel)令人畏惧的看法那样，“轮子之中可能还有轮子”，且每种事物可能看上去很复杂，包含在表面上的混乱以及几乎无尽头的各种原因、效果、转换和排列等的错综情况之中，但是却保留着最完美的规则性——被上帝的至高精神所统治的整体。

德国人亥姆霍兹、迈尔和李比希* 的情形甚至更加惊人。他们三人都属于这样一种文化，该文化在严格实证主义实践的基础上拒绝焦耳的信念。在他们的发现的时代，他们三个人，严格地说，谁也不是物理学家。另一方面，他们全都对呼吸的生理学感到兴趣。自从拉瓦锡开始，这便成为一个典型的问题，在其中，生物的机能可以用精确的物理和化学的术语进行描述，比如氧的燃烧，热的释放，和肌肉的功。因此，这个问题常吸引反对浪漫主义的猜测并急于对实验科学作出贡献的生理学家和化学家们。但是，这三位科学家何以得出结论，说呼吸以至整个自然界都是由某个基本“当量关系”统治着呢?从这个问题的解释中我们可以断定，德国哲学传统向他们灌输了一种和实证主义立场完全不同的概念，他们全都毫不犹豫地得出结论：整个自然界，自然界的每一个细部，都服从一个原理——守恒原理。

迈尔的情形是最不平常的。作为一名在荷兰殖民地爪哇工作的年轻医生，他注意到他的一个病人的静脉血具有鲜红的颜色。这一点使他得出结论：在热带气候条件下的居民为维持其体温只需燃烧较少的氧，这就使得他们的血液呈鲜红的颜色。迈尔进而要建立氧耗与能耗之间

---

* 亥姆霍兹(H. L. Helmhotz, 1821—1894)，又译赫尔姆霍茨，德国生理学家，物理学家。
迈尔(Julius, R. Mayer, 1814—1878)，德国物理学家和医师，发现能量守恒原理。
李比希(J. Von Liebig, 1803—1873)，德国化学家。——译者

的平衡关系，氧耗是能量的源泉，而能耗是在有热量损失和肌肉做功的情况下维持体温所必需的。这是一大飞跃，因为那血的颜色也可以认为是该病人的“懒惰”所致。但迈尔继续深入研究并得出结论：氧耗和热损之间的平衡不过是一种特殊的表现，它表明在一切现象的背后存在着一种不可毁灭的“力”。

这种把自然现象看作是某种潜在的现实（在其整个变化中保持不变）之产物的倾向，不由得使人联想起康德来。康德的影响还可以从某些生理学家坚持的另一种思想中找到，这思想就是把作为哲学推测的生机说与科学方法论的问题区分开来。对于这些生理学家来说，即使在生物机能的背后有潜在的“生命”力，生理学的对象也还是自然界中纯粹的物理化学对象。从上面这两种观点可以看出，康德学说既然承认数学物理学在十八世纪所采用的系统形式，因此也可以认定它是十九世纪物理学更新的一个根源。

亥姆霍兹十分公开地承认康德对他的影响。在亥姆霍兹看来，能量守恒原理不过是所有科学赖以建立的一般先验条件在物理学中的体现，这个一般的先验条件就是假定在各种自然变化的背后有一个基本的不变量：

> 科学的问题首先在于寻找一些规律，根据这些规律，可以使个别的自然过程归因于一般的规则且从一般的规则推演出来。
>
> 我们相信我们是对的，并且的确被推到这个研究过程中去了，因为我们确信自然界中的每个变化都一定有某个充分的原因。我们把现象所归到的近似原因，就其自身而言，可能是可变的，也可能是不可变的。在前一种情形，

上述的信念促使我们去寻求能够解释该变化的原因，直到最后达到不再变化的最终原因，因此这最终原因在所有外部条件都相同的各种情形下一定能产生同样的不变的效果。因此，理论自然科学的最终目标就是去发现自然现象的最后的和不再变化的原因。

通过能量守恒原理，物理学新的黄金时代的思想开始出现了，这是将要导致力学的最终一般化的时代。

这些文化上的含义是深远的，而且它们包括了这样一个概念，即把社会和人看作是转换能量的机器。但是能量转换并非问题的全部。它代表了自然的一些温和与可控的方面，然而下面一定还有另一个更加“活跃”的层次。尼兹西(Nietzsche)就是这样一些人中的一个，他们察觉到了远远在守恒或转换之外的创造与毁灭的回声。的确，只有差别(比如温度的差别或势能的差别)才能产生也是差别的结果。能量的转换不过是一种差别的消灭，同时伴随着另一种差别的产生。于是，自然界的能力就由于当量关系的使用而被隐藏起来。但是，还有自然界的另一个方面，它包括蒸汽机的锅炉，化学变化，生和死，它超出了当量关系和能量守恒的范围。这里我们便接触到了热力学最基本的贡献，即不可逆性概念。

3　热机和时间之矢

当我们把机械装置和热机进行对比，例如和火红的机车锅炉进行对比时，我们一眼就可以看出经典年代与十九世纪工艺学之间的差异。固然，物理学家首先想到的是这个差异可以被忽略，热机也可以像机械装置那样去描述，而不管蒸汽机所用的燃料却一去不复返这样一个严

酷的事实。但是这样的自满自足很快便成为不可能的了。对经典力学而言，自然界的象征是钟表；对工业时代而言，自然的象征变为一个蓄能器，它总是有耗尽的危险。世界像一个熔炉那样在燃烧；能量虽被贮存着，却也在不断消耗着。

热力学第二定律(它引出对不可逆性的第一次定量的表达)的最初表述是萨迪·卡诺(Sadi Carnot)在1824年作出的，这发生在迈尔(1842)和亥姆霍兹(1847)对能量守恒原理作出一般表述之前。卡诺紧随在他的父亲拉扎尔·卡诺* 对力学机械作了很有影响的描述之后，分析了热机。

这个对力学机械的描述假定运动是给定的。用现代的语言来说，这就相当于能量和动量的守恒。运动仅仅被转换并传递给其他物体。但是在萨迪·卡诺看来，力学的和热的机械之间的类比是自然而然的，因为他和他那时代的大多数科学家都认为，热也和机械能一样是守恒的。

从一个水位落到另一个水位的水能够推动磨盘。与此类似，萨迪·卡诺假定有两个热源，一个向热机系统供给热量，另一个(处在不同的温度)吸收前者给出的热量。使热机做功的就是热量通过位于这两个不同温度的热源之间的热机的运动——也就是火的推动力。

卡诺重复了他父亲提出的问题。哪种机器将具有最高的效率?损耗的根源是什么?什么是热量传播但不做功的过程?拉扎尔·卡诺已经得出过这样的结论：为了从一个力学的机械中得到最大的效率，就必须把它制造得能使震动、摩擦或速度的突变都减到最小——简言之，使由于以不同速度运动的物体的突然接触所造成的影响减到最小。他这样认

---

* 卡诺(Lazare Carnot，1796—1832)，法国物理学家，工程师。——译者

为，只是应用了他当时的物理学：只有连续的现象才是守恒的，所有突然的运动变化都会引起“生命力”的不可逆损耗。与此类似，理想的热机虽然不必避免以不同速度运动的物体间的一切接触，但必须避免具有不同温度的物体间的一切接触。

因此，循环一定要被设计得使任何温度变化都不是来自两个不同温度的物体间的直接热流。因为这样的热流没有任何机械效应，它们只会引起效率的损失。

因此，理想的卡诺循环简直是一种非常巧妙的装置，它得出这样的悖理的结果：在两个不同温度的热源之间进行热传输，但在不同温度的物体之间没有任何接触。理想的卡诺循环分为四个阶段。在两个等温阶段的每一个中，系统与两个热源中的一个相接触，而且保持在该热源的温度上。当接触温度高的热源时，它吸热并膨胀；当接触温度低的热源时，它放热并收缩。连接这两个等温阶段的是另两个阶段，此时该系统与热源隔绝，就是说，热量不再进入或离开该系统，但系统的温度则分别由于膨胀和压缩而发生变化。体积不断地改变，直到系统从一个热源的温度达到另一个热源的温度(参阅图 2)。

十分值得注意的是，这个对理想热机的描述并没有提到不可逆过程，而理想热机正是在不可逆过程的基础上才能实现。并且丝毫没有提到熔炉中正在烧着煤。此处的模型只与燃烧的效果有关，这个效果使两个热源之间的温度差得以维持。

1850年，克劳修斯* 从能量守恒所提供的新的角度描述了卡诺循环。他发现，卡诺所说的需要有两个热源和他提出的理论效率公式表达出热机所特有的问题：一定要有一个对转换进行补偿的过程 (在此处的

---

* 克劳修斯(R. J. Clausius, 1822—1888)，德国物理学家，提出熵的概念，发展了热力学理论。——译者

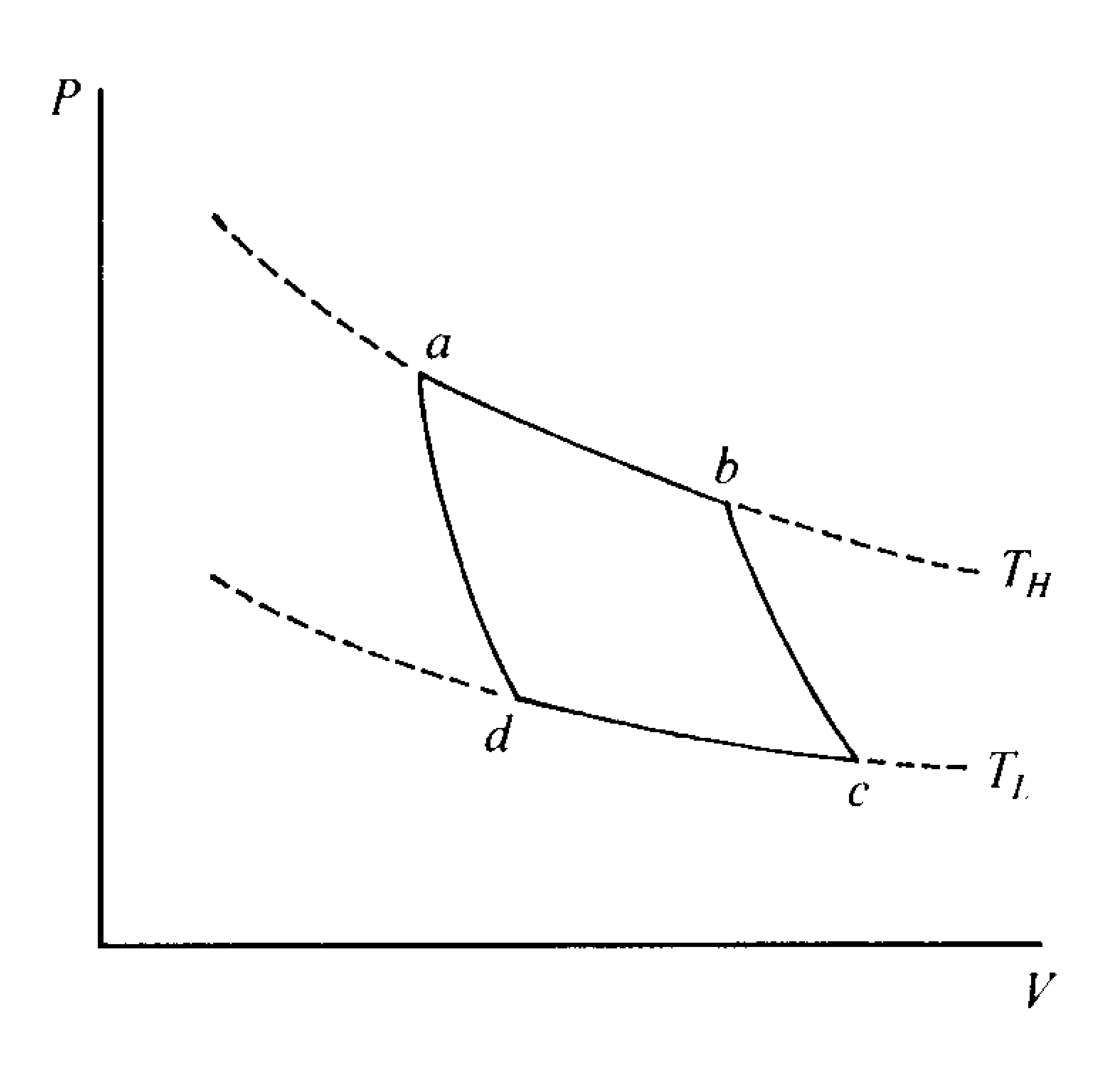


图 2　卡诺循环的压力-体积示意图

一个热机在两个热源之间工作，一个"热"的热源，其温度为 T_H，另一个"冷"的热源，其温度为 T_L。在状态 a 和状态 b 之间有一个等温的变化：系统保持在温度 T_H，吸热并膨胀。在 b 和 c 之间，系统保持膨胀但却是绝热的，其温度从 T_H 下降到 T_L。这两步产生机械能。在 c 和 d 之间有第二个等温变化：系统被压缩并放热，同时温度保持在 T_L。在 d 和 a 之间，系统又是绝热的，且在其温度增加到 T_H 的同时被压缩。

例子里，就是用接触一个低温热源的方法进行冷却的过程)，以便使热机恢复到它初始的力学状态和热学状态。在表达能量转换的平衡关系中，现在又加上在两个过程对系统状态的效应间的新的等效关系，一个过程是热源之间的热流，另一个是热转换为功。一门新的科学——热力学(它把机械效应和热效应联系起来)出现了。

克劳修斯的工作清楚地表明，我们不能无限制地使用自然界所提供的似乎是用之不竭的蓄能器。并非一切能量守恒过程都是可能的。例如，不破坏一个至少等量的能量差，就不可能产生出一个新的能量差。因此，在理想的卡诺循环里，做功的代价是热所付出的，这热量从一个热源传到了另一个热源。一方面产生机械功，另一方面传输了热量，这两个方面所表达的结果被一个当量关系联系起来。这个当量关系在两个方向上都是有效的。令同一个热机倒过来工作，则它在消耗所做的功

的同时,可以恢复原来的温度差。任何使用单一热源的热机都不可能被构造出来。

克劳修斯并不比卡诺更关心损耗的问题,由于损耗,一切实际热机的效率都低于理论上所预想的理想值。克劳修斯和卡诺一样,其描述相当于一种理想化。这导致确定自然加给热机收益的极限。

但是,自十八世纪以来,理想化的状态已经改变了。在能量守恒原理的基础上,新的科学不仅要求描述理想化,而且要描述自然本身,包括“损耗”。这就提出了一个新问题,不可逆性便由此而进入了物理学。人们怎样去描述在实际热机中所发生的现象? 怎样把损耗包括到能量平衡中去?损耗为什么能减低效率?这些问题的提出为热力学第二定律铺平了道路。

4 从工艺学到宇宙学

我们已经看到,卡诺和克劳修斯所提出的问题导致对基于守恒和补偿的理想热机的描述。此外,它还使人们有机会提出一些新问题,例如能量耗散的问题。威廉·汤姆孙非常敬佩傅里叶的工作,他很快就抓住了该问题的重要意义,并在1852年第一个表述了热力学第二定律。

卡诺认定热机功率损耗的一种可能的原因是傅里叶的热传播。因此卡诺循环(不再是理想循环,而是“实际”循环)成了十九世纪发现的两种普适性——即能量守恒和热传播——的汇合点。这两个发现的结合引导汤姆孙去表述他的新原理:自然界中存在着一种使机械能逐渐减损的普遍趋势。请注意这“普遍”一词,它显然具有宇宙学的涵意。

拉普拉斯的世界是永恒的,是一个理想的永动机。由于汤姆孙的宇宙学不仅是新的理想热机的一个反映,而且把不可逆热传播的结果纳

入了能量守恒的世界,因此这个世界被描述为一个机器,其中热被转换为运动只是以不可逆的浪费和无用的耗散为代价。自然界中能够产生效应的差别在逐渐减小。世界在从一种转换走到另一种转换的过程中逐渐用完它的种种差别,而趋向热平衡的终态——“热寂”。按照傅里叶定律,最后将不再有任何能够产生机械效应的温度差。

这样,汤姆孙便作出了从热机工艺学到宇宙学的令人昏乱的飞跃。他对第二定律的表述是用他那时代的科学术语来措辞的:能量守恒,机器,和傅里叶定律。还可以清楚地看到,文化环境所起的作用是很重要的。在十九世纪,时间的问题具有新的重要意义,这在一般说来是被接受的。的确,时间的根本作用在所有领域中都被注意到了:在地质学中,在生物学中,在语言中,以及在对人类社会演变和伦理学的研究中。但有趣的是,被引进物理学中的时间的特殊形式,即一种通向均匀和死亡的趋势,使我们想起的不是生物学和社会科学所描述的那种不断的复杂化和多样化,而是古代神话和宗教的原型。回到这些古代的题目上去,可以看作是当时社会和经济动乱在文化上的反应。人和自然相互作用的工艺方式的迅速改革,十九世纪所经历的不断加快的变革步伐,造成了一种深深的忧虑。这个忧虑至今仍伴随着我们,并且以各种各样的形式出现:从反复建议要有一个“零增长”社会或要禁止科学研究,到宣布关于我们这个分解着的宇宙的“科学真理”。在天体物理方面,现今的知识仍然是贫乏且非常成问题的,因为在这个领域中,引力效应起着主要作用,不少问题却暗示要同时利用热力学和相对论。然而,这个领域中的大多数著作都一致地预言最终的恶运。最近的一本书的结论写道:

令人不快的真理看来是,宇宙的无可挽回的分裂如我们所知的那样,是肯定无疑的。支撑着一切有序活动(从人

类到星河)的组织性正在慢慢地但又不可避免地减少着，甚至会被总的引力坍缩所湮灭。

另一些人是比较乐观的。在一篇论述宇宙能量的出色文章中，弗里曼·戴森(Freeman Dyson)写道：

> 但是可以想象，生命所起的作用可能比我们曾经想象的还要大。在按照自己的目的去塑造宇宙的活动中，生命会克服一切不利因素而获得成功。并且对这个无生气的宇宙的设计不可能像二十世纪科学家曾经想假定的那样离开生命的潜力和智能。

不管霍金(Hawking)和其他人取得了多么重要的进步，我们对我们宇宙中大规模变化的知识仍然是不充分的。

5 熵的诞生

1865年，轮到克劳修斯出来作出从工艺学到宇宙学的飞跃。起初，他只是重新表述了他先前得到的结论，但在这样做的时候他引进了一个新的概念，即熵。他最初的目的是要在守恒的概念和可逆性的概念之间作出清楚的区分。力学变化中可逆性和守恒是吻合一致的，而物理化学的变化却不同，即使它们不可能是可逆的，却也能够是能量守恒的。这在例如摩擦的情形中是真的，这时运动被转换为热，又例如在傅里叶描述过的热传导的情形中。

我们已经熟悉能量，它是系统状态的一个函数，就是说，只依赖于能够确定系统状态的参数(压力、体积、温度)值的函数。但是我们必须超

出能量守恒原理并寻找区分卡诺循环中“有用的”能量交换与不可逆地浪费掉的“耗散的”能量的表达方式。

这正是克劳修斯的新函数所起的作用。这新函数就是熵，通常记作S。

显然，克劳修斯只是希望用一种新的形式去表达一个热机在其循环终点回到其初始状态的必要性。熵的最初定义集中在守恒这一点上：无论循环是不是理想的，在每一次循环结束时，系统的状态函数——熵，都回到它初始时的数值。一旦我们放弃理想化条件，熵与能量就不再并驾齐驱了。

让我们考虑在一个短的时间间隔dt中熵的改变量dS。对理想的机械与实际的机械，情况十分不同。在前一种情形，dS可以完全通过机械与环境之间的交换表达出来。我们可以设计一些实验，其中热是由系统提供的，而不是流进系统的。与之相应的熵的改变量就只是改变它的符号。因此，这种对熵的贡献(我们称作d_eS)，就其符号可正可负这个意义来讲，是可逆的。在实际的机械中，情况根本不同。这里除了可逆的交换之外，我们还有在系统内部的不可逆过程，诸如热损耗、摩擦等。这些不可逆过程引起系统内部熵的增加或“熵产生”。这个熵的增加(我们称作d_iS)不能通过与外界作逆的热交换来改变其符号。正如一切不可逆过程(例如热传导)的情形那样，熵产生总是在同一方向上进行的。换句话说，d_iS只能是正的，或是在没有不可逆过程时为零。注意，d_iS的正号只是习惯上选用的，它当初也完全可以被选择为负的。要点是这个改变量是单调的，即熵产生不会随着时间的前进而改变符号。

选择d_eS与d_iS这种记法，是为了提醒读者注意，第一项关系到与外界的交换(e是exchanges的首字母)，而第二项指系统内部(i是inside的

首字母)的不可逆过程。因此，熵的改变量dS是d_eS与d_iS这两项之和，而d_eS与d_iS具有完全不同的物理定义。

为了掌握熵的改变量这样分解为两部分的特点，我们可以把我们的表述用在能量上。让我们把能量记作E，而能量在短的时间间隔dt内的改变量记作dE。我们当然仍可把dE写作两项之和，其中一项是d_eE，它来自能量的交换，另一项d_iE联系着能量的"内部产生"。不过，能量守恒原理指出，能量只能从一个地方传递到另一地方，而永远不会被"产生"出来。因此，能量的改变量dE约化为d_eE。另一方面，如果我们取一个非守恒的量，比如某个容器中所含有的氢分子的数量，那么这个量就的确不仅会由于向容器中增添氢而改变，也会通过容器内部发生的化学反应而改变。但是在这种情况下，"产生"这一项的符号是不确定的。按照不同条件，我们可以产生氢分子，也可以用把氢原子传给其他化学组分的方法消灭氢分子。第二定律独特的地方在于这样的事实：产生项d_iS永远是正的。熵产生表示出在系统内部发生了不可逆的变化。

克劳修斯能够用系统获得(或提供)的热量来定量地表达熵流d_eS。在被可逆性与守恒性概念所统治的世界中，他主要关心的就是这一点。在涉及到熵产生中所包含的不可逆过程时，他只说到存在着不等式$d_iS/dt>0$。尽管如此，还是取得了重要进步，因为如果我们离开卡诺循环，考虑其他热力学系统，就依然可以作出熵流与熵产生之间的区分。对于一个与周围环境没有任何交换的孤立系统，熵流按照定义等于零。只剩下熵产生这一项，并且系统的熵只能增加或者保持不变。于是这里不再有把不可逆变化看作是可逆变化的近似的问题，增加着的熵相当于系统自发地进化。这样一来，熵变成了一个"进化的指示器"，或像爱丁顿恰当地所说的"时间之矢"。对一切孤立系统，未来就是熵增加的方向。

有什么系统能比整个宇宙更"孤立"呢?这个概念构成了1865年克

劳修斯对热力学两个定律所作宇宙学表述的基础：

宇宙的能量是常量。

宇宙的熵趋于最大。

说孤立系统的熵增加到一个最大值，这种说法远远超出热力学发源处的工艺学问题的范围。不断增加着的熵，现在不再是损耗的同义词，而是关系到系统内部的自然过程。这些过程最终把系统带到对应于最大熵状态的热力学“平衡态”。

在第一章中，我们强调指出隐含在牛顿动力学普适定律的发现中的那个奇怪的因素。这里，那个奇怪的因素又成为显然的了。当萨迪·卡诺表述理想热机的定律时，他根本没有料到，他的工作会导致一场物理学概念上的革命。

可逆变化属于经典科学是在这样的意义上说的，即可逆变化确定了对一个系统施加作用的可能性，确定了控制该系统的可能性。动力学对象可以通过其初始条件来加以控制。同样，当一个热力学对象是用其可逆的变化来定义时，这个对象可以通过其边界条件来加以控制：任何处于热力学平衡的系统，当其温度、体积或压强是逐渐改变时，系统通过一系列的平衡态，而任何逆操作都导致系统回到其初态。这种变化的可逆性质和对象通过边界条件进行控制，这两者是互相依存的。在这个背景上，不可逆性是“负”的，它以“不可控”变化的形式出现，这种变化在系统摆脱了控制时会立即发生。但是，反过来，不可逆过程可以被看作是当利用实验装置来束缚自然时，自然所表现出来的自发的和内在的活性的最后残余。

因此，耗散的这种“负”的性质标志着热力学对象与动力学对象不

同，它们只能部分地被控制。有时候，它们会突然摆脱控制，自发地变化起来。

对于一个热力学系统来说，变化并不都是等效的。这正是表达式$dS=d_eS+d_iS$的真正含义。趋向平衡的自发变化d_iS与通过改变边界条件(如环境温度)来确定和控制的变化d_eS，有不同的性质。对于一个孤立系统，在这个意义下平衡态可以看作是非平衡态的一个“吸引中心”。于是我们最初的断言可加以推广：趋向吸引中心的变化与所有其他变化不同，特别是与边界条件所确定的变化不同。

马克斯·普朗克经常强调自然界中这两类变化的区别。普朗克写道，自然看来“偏爱”某些态。熵的不可逆增加d_iS/dt描述了系统趋向于一个“吸引”它的态，该系统偏爱这个态，它自身的“自由意志”不会使它偏离这个态。“按照这个观点，自然不允许有这样的过程：它发现它们的终态比初态具有较小的吸引力。可逆过程是极限情形，在可逆过程中，自然对其初态和终态的偏爱是相同的，这就是它们之间的过渡可以在两个方向上任意进行的原因。”

与动力学相比，这种语言是多么不相干啊！在动力学中，系统按某一轨道变化，轨道一旦给定，就永远给定了，轨道的起点永远不会被忘记(因为初始条件确定着任何时刻的轨道)。相反，在一个孤立系统中，所有非平衡的情形都产生趋于同一种平衡态的变化。在到达平衡态时，系统已经忘记了它的初始条件，即它的制备方法。

因此，平衡系统的比热或可压缩性是与系统建立方式无关的特性。这是个很幸运的情形，它大大简化了对物质的物理状态的研究。的确，复杂系统是由极大数目的粒子组成的。从动力学的立场出发，在实践上无法重复这种系统的任何态，因为可能发生的动力学态有无穷多个。

我们现在面对着两种根本不同的描述:动力学和热力学。前者适用于运动世界，后者是具有向熵增加方向变化的内在倾向的复杂系统的科学。这种两分法立即提出了这样的问题:这两种描述有何关系?自从热力学定律被表述以来,这个问题就一直在争论中。

6 玻耳兹曼有序性原理

热力学第二定律包含两个基本因素:(1)一个“负”的因素,它表达了某些过程的不可能性(热从高温热源流向低温热源,反过来却是不可能的),(2)一个“正”的、建设性的因素。第二个因素是第一个因素的结果。正是某些过程的不可能性使我们可以引进一个函数,即熵,对于孤立的系统,它总是在增加着。熵的行为像是孤立系统中的一个吸引中心。

热力学的表述怎能和动力学相调和呢?在十九世纪末,多数科学家认为这是不可能的。热力学的原理是新的定律,它们构成一种不可能约化为传统物理学的新科学的基础。无论是能量在性质上的多样性,还是能量趋于耗散的倾向性,都必须被当作新的公理来接受。这就是“唯能论者”反对“原子论者”的论据。后者拒绝放弃他们认为是物理学基本使命的东西，即把自然现象的复杂性约化为由运动定律所表达的基本行为的简单性。

实际上，从微观层次到宏观层次的过渡问题后来表明对整个物理学的发展是特别富有成果的。玻耳兹曼第一个接受了这个挑战。他感到,为了使轨道的物理学扩展到包括热力学所描述的情形,必须发现新的物理概念。随着麦克斯韦的脚步,玻耳兹曼要在概率论中找到这个概念上的革新。

概率在描述复杂现象时可能起某种作用,这并不令人惊奇:麦克斯

韦本人看来便受到了社会学中“平均人”的创造者凯特尔* 的著作的影响。这个创造要在物理学中引进概率，并不是把它当作一种近似的手段，而是当作一种解释原则，它要用概率来证明，假设一个系统是由大量粒子组成的，因而概率定律可以适用，那么该系统可能会显示出一种新型的行为。

让我们考虑一个把概率概念应用于物理学的简单的例子。一个由 N 个粒子组成的系统装在一个分为相等的两格的盒子中。问题是要求出粒子在两格中的各种可能分布的概率，也就是在第一格中找到 N_1 个粒子(第二格中有 $N_2=N-N_1$ 个粒子)的概率。

用组合分析方法，很容易计算出实现 N 个粒子的每一种不同分布的方式的数目来。例如，如果 $N=8$，那么只有一种方式能把这八个粒子放到一格内。但是，如果像在经典力学中那样，我们假定这些粒子是可分辨的，那么把一个粒子放到一格内而把其余的七个粒子放到另一格内，就有八种不同的方式。进一步说，把这八个粒子在两格中均匀分布，可以有 $8!/4!4!=70$ 种不同的方式(这里 $n!=1\cdot2\cdot3\cdots(n-1)\cdot n$)。类似地，无论 N 为何值，在物理学上都可以确定一个**配容数** P，它给出实现任何给定分布 N_1,N_2 的方式数。它的表达式是 $P=N_!/N_1!N_2!$。

对于任何给定的粒子总数，N_1 与 N_2 的差越小，则配容数越大。当粒子总数在两格中均匀分布时，配容数最大。而且，N 的值越大，相应于不同分布方式的配容数之差也越大。在宏观系统中 N 的值为 10^{23} 的数量级，因此最可能的分布是 $N_1=N_2=N/2$ 这种分布。对于由大量粒子组成的系统，与对应于均等分布的态不同的一切态就都几乎是不可能的。

* 凯特尔(Quetelet, 1796—1874)，比利时数学家、天文学家、统计学家和社会学家，以将统计学和概率论应用于社会现象而著名。在《社会物理学》中，提出了“平均人”的概念作为中心值，一个人的行为度量，在这个中心值周围按照正态分布。——译者

玻耳兹曼第一个认识到，熵的不可逆的增加可以看作是一种分子无序性增长的表达，逐渐忘记任何初始非对称性的表达，因为与对应于最大配容数 P 的态相比，任何非对称性都会减少配容数。因此，玻耳兹曼的目标是把熵 S 和配容数等同起来：通过达到每一宏观态的方式数 P，熵成为该宏观态的标志。玻耳兹曼提出的著名关系式 $S=k\lg P$ * 用定量的形式表达了这一思想。这个公式中的比例因子 k 是一个普适常数，即众所周知的玻耳兹曼常数。

玻耳兹曼的结果意味着，不可逆的热力学变化是一个趋向于概率增加的态的变化，而且吸引中心态是相应于最大概率的一个宏观态。这立即使我们远远超出了牛顿。物理概念第一次用概率解释出来。它的用处是非常明显的。概率可以恰当地解释系统对一切初始非对称性的忘记，对一切特殊分布(例如全部粒子集中于系统的某一子区域内，或两种不同温度的气体混合时所产生的速度分布)的忘记。这种忘记之所以可能，是由于系统的无论哪种特殊的演化，都将最终导致与无序的或最大对称性的宏观态相应的微观态之一，因为这样的宏观态对应于最可能的微观态。一旦达到这个态，系统就只会在小的时间间隔内从这个态移动小的距离。换句话说，系统只能在吸引中心态附近涨落。

玻耳兹曼有序性原理指出，一个系统的最可几状态是这样一个态，其中系统中同时发生的许多事件彼此在统计的意义上互相抵消。回到我们的第一个例子，无论初始分布如何，系统的演化将最终导致 $N_1=N_2$ 的均等分布。这个态将是系统不可逆宏观演化的一个终点。当然，粒子将继续从一格移动到另一格，但从平均效果上看，在任一给定瞬间，一个方向上的移动粒子数将与另一方向上的移动粒子数相等。结果，粒子

* 这个对数表达式指出，熵是一个相加的量($S_{1+2}=S_1+S_2$)，而配容数是一个相乘的量($P_{1+2}=P_1\cdot P_2$)。

的运动将只引起在平衡态 $N_1=N_2$ 附近的小的、短时间的涨落。因此，玻耳兹曼的概率解释使我们可以理解平衡态热力学所研究的吸引中心的特殊性。

这并不是问题的全部，我们将在本书的第三部分作更为详细的讨论。在此稍加说明就足够了。在经典力学中(我们将看到，在量子力学中也是一样)，任何事物都由初态和运动定律决定。那么，概率是怎样进到对自然的描述中去的呢？在这里恐怕要乞求于我们对系统精确动力学态的无知。这就是对熵的主观主义解释。这种解释被接受，是因为不可逆过程被看作只是相应于摩擦或更一般地相应于热机工作中的损耗的讨厌东西而已。但是今天情况已经改变。我们将看到，不可逆过程具有非常大的建设性的作用：没有不可逆过程就不可能有生命。因此，这种主观主义的解释是非常值得怀疑的。我们自己只是我们无知的结果吗？是我们只能观察宏观态的结果吗？

而且，无论在热力学中还是在其概率解释中，时间都显出一种非对称性：熵在未来的方向上增长，而不是在过去的方向上增长。如果我们考虑对于时间反演来说是不变的动力学方程，那么这种时间的非对称性似乎是不可能的。我们将看到，热力学第二定律是一个选择原则，它与动力学相容，却不能从动力学推演出来。它为动力学系统的可能的初始条件确定了一个极限。因此热力学第二定律标志着与经典力学或量子力学的机械论世界的根本分歧。现在我们回到玻耳兹曼的工作上来。

上面所讨论的是孤立系统的情况，其中粒子数和系统的总能量都是由边界条件确定的。但是，有可能把玻耳兹曼的解释扩展到开放系统中去。所谓开放系统，就是与外界环境互相作用的系统。有一种封闭系统由边界条件确定得使它通过与周围环境交换热量而保持温度 T 不变，这时平衡态不是由熵的最大值确定，而由一个类似的函数的最小值

确定，这个函数就是自由能 $F=E-TS$，其中 E 是系统的能量，T 是温度(以所谓开氏温标来量度，用开氏温标时，水的冰点是273K，沸点是373K)。

这个公式的结构表达了这样的事实，即平衡乃是能与熵之间竞争的结果。温度决定着这两个因素的相对权重。在低温下，能量占优势，我们得到有序(低熵)和低能结构比如晶体的形式。在这些结构内部，每个分子与其相邻的分子相互作用，其动能与相邻分子间相互作用的势能相比是很小的。我们可以想象，每个粒子都被它与相邻粒子的相互作用"囚禁"着。但是，在高温下，熵占统治地位，因而显出分子的无序状态。相对运动的重要性增加了，晶体的规则性破坏了；随着温度的增高，我们先是得到液态，接着得到气态。

孤立系统的熵 S 和系统在固定温度下的自由能 F 是"热力学势"的例子。热力学势 S 或 F 所取的极值确定吸引中心态，边界条件对应着这些热力学势的确定的那些系统将会自发地趋向这些态。

玻耳兹曼有序性原理还可以用来研究结构的共存(如液相与固相共存)或已结晶的产物与在溶液中的同一产物之间的平衡。但是这些平衡结构都是确立在分子水平上，记住这一点很重要。正是作用于大约 10^{-8} 厘米数量级(这是分子中原子直径的数量级)范围内的分子间的相互作用，使得晶体结构稳定，并赋予它宏观性质的。另一方面，晶体的尺寸并不是该结构的内在性质。它取决于平衡态下晶相物质的数量。

7 卡诺和达尔文

平衡态热力学为大量的物理化学现象提供了一个满意的解释。然而，人们或许要问：平衡结构的概念是否包含我们在自然界中所遇到的

不同类型的结构?显然,这个问题的答案是否定的。

平衡结构可以看作是大量微观粒子(分子、原子)活动的统计抵偿的结果。按定义,它们在整体的水平上是稳定的。正是由于这个原因,它们也是“永存”的。它们一旦形成,就会被孤立起来并无限地保持下去,而不会与环境进一步发生相互作用。但是,当我们研究一个生物细胞或一个城市时,情况就十分不同了:这些系统不仅是开放的,而且实际上只是因为它们是开放的,它们才得以存在。它们是靠从外界来的物质和能量的流来维持的。我们可以孤立一个晶体,但如果切断城市或细胞与环境的联系,它们就会死掉。它们形成了世界的一个组成部分,而它们是靠这个世界来维持的。它们不能从它们不断在变换着的流中被分离出来。

但是,不仅生命世界与热力学平衡的模型有着深刻的差别,流体力学和化学反应通常也包含与外部世界进行的物质和能量交换。

很难看出玻耳兹曼有序性原理怎能适用于这些情况。系统随着时间的进程会越来越均匀,这个事实可以用配容数来解释。在均匀态,当由初始条件产生的“差异”已被忘记的时候,配容数将是最大的。但是按照这种观点,自发的对流就是无法理解的。对流要求相干性,要求大量分子的合作。它与无序是对立的,是一个独特的态,这个态只有一个较小的配容数能与之相对应。因此,从玻耳兹曼的意义上讲,它是一种“不可几”状态。如果连对流也算是个“奇迹”的话,那么对生命还能说些什么呢?因为即使是最简单的有机体,就已有了极其特殊的性质了。

平衡模型的关系问题可以倒过来提出。为得到一个平衡系统,必须把它“保护”起来,以避开组成自然界的流。换句话说,就是必须把它们装进罐头或瓶子里,就像歌德的《浮士德》里的矮子那样,他对创造出他的炼金术士说道:“你来,请轻轻地将我抱在怀里,但不要太紧,以免玻

璃破裂。这本是事物的常理:宇宙对于自然物都嫌太窄,人工的产品需要隔绝天地。”在我们熟悉的世界中,平衡态是很少见的并且不安定的态。甚至趋于平衡态的过程也隐含着如我们那样的世界,它离太阳足够远,使系统的部分孤立成为可以想象的(在太阳的温度下,任何“装罐”都是不可能的),但是在那里,非平衡态是常例。这就是一个平衡态与非平衡态共存的“微温”世界。

但是,在很长的时间内,物理学家们认为他们能够把晶体的稳定结构确定为惟一可以预言且可以重新生成的物理秩序,并把平衡态看作惟一能从物理学基本定律导出的变化过程。因此,对热力学描述的任何外推,都要把生物学和社会科学所描述的进化定义成罕见的和不可预言的。例如,达尔文的进化过程——稀有事件的统计性选择——怎能与玻耳兹曼描述的一切特殊性即一切稀有构形的统计消失调和起来呢?罗杰·开罗瓦(Roger Caillois)问道:“卡诺与达尔文能够都正确吗?”

值得注意的是,从本质上说,达尔文的方法和玻耳兹曼探索的道路有多么相似!这也许并不是一种巧合。我们知道,玻耳兹曼曾经盛赞达尔文。达尔文的理论始于物种自发涨落这样一种假定,然后,选择引出了不可逆的生物进化。于是,就如同玻耳兹曼的结论一样:随机性引出不可逆性。然而结果却大不相同。玻耳兹曼的解释隐含着对初始条件的忘记,隐含着初始结构的“破坏”,而达尔文的进化却联系着自组织性,联系着不断增加的复杂性。

概括我们的论述,平衡态热力学是物理学对自然界的复杂性问题作出的第一个响应。这个响应是用能量的耗散、初始条件的忘却、趋向无序的演化这样一些术语来表达的。经典力学,即关于永恒和可逆的轨道的科学,不同于被进化概念统治的十九世纪所面临的那些问题。平衡态热力学能够把它自己关于时间的观点(即认为时间隐含着衰退和死亡

的观点)与其他科学的观点对立起来。如我们已看到的,狄德罗已经提出了问题:我们这些有机的有感觉的生物,在一个由动力学所统治的惯性世界里究竟位于何处呢?现在又加上了一个问题,这个问题已经纠缠我们一个多世纪了,这就是:生物的进化在热力学所描述的世界里,即在一个不断增加无序性的世界里,究竟有什么意义?在趋于平衡态的热力学时间与发生着趋向增加复杂性的进化的时间之间存在着什么关系?

柏格森是正确的吗?时间究竟是创造的媒介,还是什么都不是?

第五章　热力学的三个阶段

1　流　和　力

让我们回到上一章给出的热力学第二定律的描述上来。在对进化的描述中，熵的概念起着中心的作用。如我们已经看到的，熵的改变量可以写作两项之和。一项是d_eS，它联系着系统与外界的交换；另一项是d_iS，它是由系统内部的不可逆现象引起的。后一项永远是正的，惟一的特例是在热力学平衡态，它变为零。对于孤立系统($d_eS=0$)，平衡态对应于熵最大的状态。

为了估价热力学第二定律的物理意义，我们要更详细地描述各种不可逆过程，它们涉及到熵产生d_iS，或单位时间内的熵产生$P=d_iS/dt$。

对我们来说，化学反应具有特殊的意义。伴随着热传导，化学反应组成了不可逆过程的原型。化学过程除了其自身固有的重要性之外，还在生物学中起着基本的作用。活着的细胞就是处在永不停息的新陈代谢活动之中。这里有几千个化学反应同时发生，改造着细胞赖以生存的物质，合成基本生物分子，并清除产生出来的废物。无论就其不同的反

应速率，还是在细胞内的反应地点而言，这种化学活动性都是高度协调的。生物结构就因此而把有序与活动性结合起来。与此相反，平衡态尽管可以是有结构的比如像晶体那样，但却仍然是不活动的。化学过程能否为我们提供一把钥匙去弄清晶体行为与细胞行为间的差别呢？

我们必须从双重的观点，即动力学的观点和热力学的观点出发，来考虑化学反应。

按照动力学的观点，基本的量是反应速率。经典的化学动力学基于这样的假定，即一个化学反应的速率与参与反应的生成物的浓度成正比。的确，反应是通过分子间的碰撞而发生的，同时可以很自然地假定：碰撞数与反应分子的浓度的积成正比。

作为例子，我们取如下的简单反应：$A+X \longrightarrow B+Y$。这个“反应方程”的含义是，每当成分A的一个分子遇到成分X的一个分子时，反应将以某个概率发生，并且产生出一个B的分子和一个Y的分子。产生这种有关分子的变化的碰撞，就是一个“反应碰撞”。在所有的碰撞中，只有一部分(通常是很小的一部分，例如$1/10^6$)是这种所谓反应碰撞。在大多数情况下，分子维持着它们原来的性质，仅仅是交换能量。

化学动力学处理反应过程中不同生成物的浓度变化。这个动力学是由微分方程描述的，正如运动由牛顿方程描述一样。但是，在这情形中，我们不计算加速度，而是计算浓度的变化率，浓度变化率被标为反应物浓度的函数。因此，X的浓度的变化率dX/dt与溶液中A和X的浓度的积成正比，就是说$dX/dt=-kA \cdot X$，其中k是一个比例因子，它与温度和压力等量有关，并且为所发生的并导致反应$A+X \longrightarrow Y+B$的反应碰撞所占的部分提供了一个度量。因为，在所举的例子中，每当一个X分子消失时，一个A分子也要消失，而且形成一个Y分子和一个B分子，所以它们的浓度变化率是有关系的，即$dX/dt=dA/dt=-dY/dt$

$= -dB/dt$。

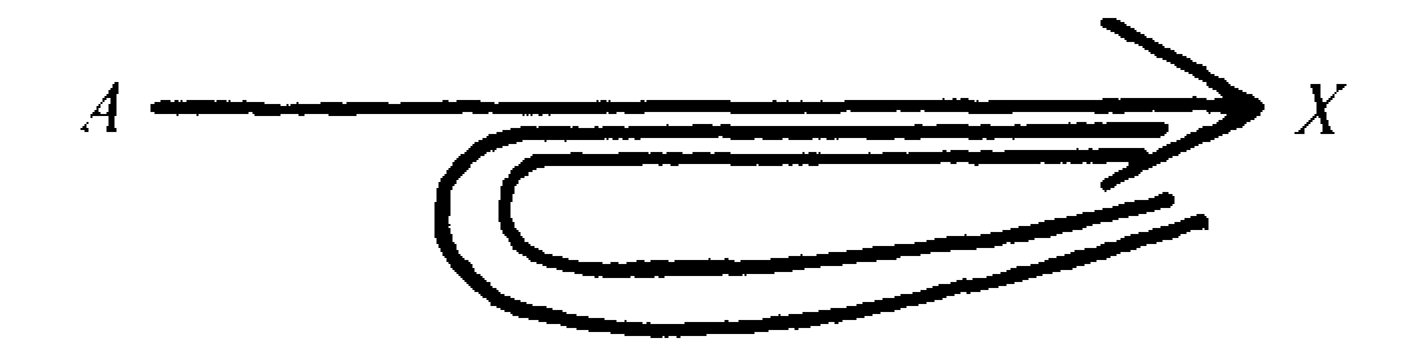
但是，如果一个X分子与一个A分子的碰撞能引起一个化学反应，那么Y与B分子的碰撞就能引起相反的反应。因此，在所说的系统内会发生第二种反应$Y+B \longrightarrow X+A$，这就为X的浓度带来了附加的变动$dX/dt=k'YB$。化合物浓度的总变动量就由正反应和逆反应之差给出。在我们的例子里，$dX/dt(=-dY/dt=\cdots)=-kAX+k'YB$。

如果任其进行下去，那么一个发生着化学反应的系统就趋于一个化学平衡态。因此，化学平衡态是"吸引中心"态的一个典型例子。无论其初始化学组成如何，该系统都会自发地达到这个最终阶段，其中正反应和逆反应在统计的意义上互相抵消，以致在浓度上不再有任何总体的变动（即$dX/dt=0$）。这种统计上的抵消说明平衡浓度间的比率是由$AX/YB=k'/k=K$给出的。这个结果就是众所周知的"质量作用定律"或哥德堡和瓦格定律，K是平衡常数。由质量作用定律所决定的浓度间的比率对应于化学平衡态，这和温度的均一(在孤立系统的情形)对应于热平衡态是完全一样的。相应的熵产生为零。

在我们讨论化学反应的热力学描述之前，让我们简要地考虑动力学描述的一个附加的方面。化学反应的速率不仅受到参加反应的分子的浓度和热力学参数(例如压力和温度)的影响，而且可能受到系统中存在某些化学物质的影响，这些化学物质改变反应速率，而它们本身在反应过程中并不变化。这类物质被称为"催化剂"。例如，催化剂可以改变动力常数k或k'的值，或者甚至使系统能沿着一条新的"反应路径"进行反应。在生物学中，这个作用是由一些特殊的蛋白质即"酶"来完成的。这些大分子的空间配置，使得它们能够改变给定反应的速率。它们常常是极特殊的，只影响一种反应。就酶的催化作用而言，一种可能的机制是提供不同的"反应场所"，反应中的不同分子倾向于把它们自己引向

这些场所,因而增加了接触和反应的可能性。

有一类催化反应很重要(尤其是在生物学中),在这种反应中,一种产物的存在正是合成它自己所需要的。换句话说,为了产生分子X,我们必须从一个已经含有X的系统开始。例如极为常见的,分子X激活一种酶。它通过把自己束缚到这个酶上,而稳定那个提供有效反应场所的特殊构形。与这种自催化过程对应的反应模式有如下例:$A+2X \longrightarrow 3X$,在分子X存在时,一个A分子转变为一个X分子。因此,我们需要X,以便产生更多的X。这种反应可以用反应"环"来加以符号化:含有这种"反应环"的系统的一个重要特点是,描述该系统中发生的变化的动力学方程是非线性微分方程。



如果我们应用上述的同样方法,则对$A+2X \longrightarrow 3X$这一反应所得出的动力学方程为$dX/dt = kAX^2$,式中X的浓度的变化率与它的浓度的平方成正比。

在生物学中,另一类非常重要的催化反应是交叉催化反应,例如$2X+Y \longrightarrow 3X$,$B+X \longrightarrow Y+D$,这种反应可以用图3的环来表示。

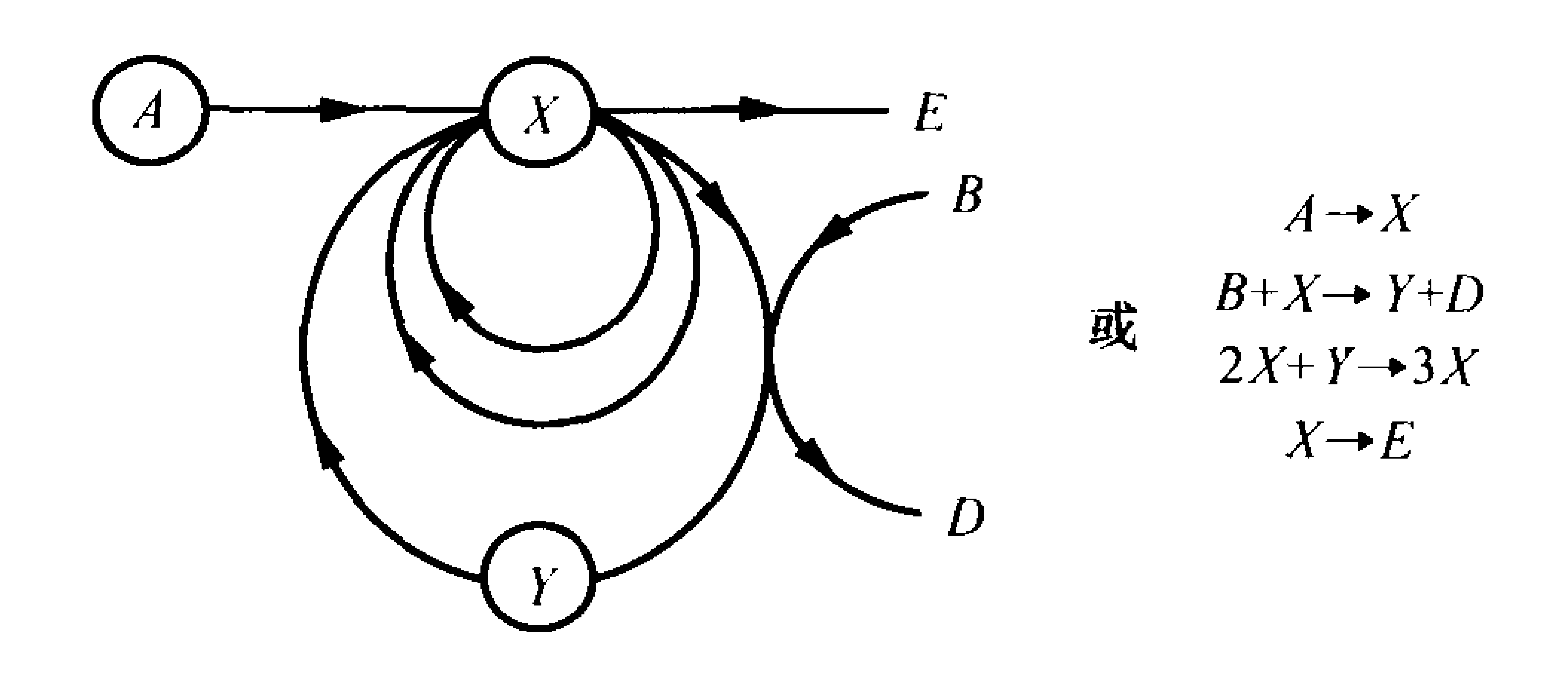


图3　代表"布鲁塞尔器"反应的反应路径(详述见正文)

这是一种交叉催化反应，因为 X 是由 Y 产生的，而同时 Y 又是从 X 产生的。催化作用不一定增加反应速率，相反，它可以导致反应的禁止，这也可以用适当的反馈环来表示。

用来描述带有催化步骤的化学过程的非线性微分方程的特殊数学性质，对于远离平衡的化学过程的热力学而言，如我们稍后将看到的那样，是极为重要的。此外，我们已经提到，分子生物学所建立的这些环，在代谢机能中起着关键作用。例如，核酸与蛋白质之间的关系可以用一种交叉催化效应来描述：核酸含有产生蛋白质的信息，而蛋白质反过来又产生核酸。

除了化学反应速率之外，我们还要考虑另一些不可逆过程的速率，比如热传导和物质扩散。不可逆过程的速率也称为流，并记作 J。没有什么普遍的理论使我们能导出速率或流的形式。在化学反应的情形，速率与分子机制有关，这可以用我们已给出的例子来加以验证。不可逆过程的热力学引入第二种量：除了速率或流 J 之外，热力学使用“引起”流的“广义力”X。最简单的例子是热传导的广义力。傅里叶定律告诉我们，热流 J 与温度梯度成正比。这个温度梯度正是引起热流的“力”。按定义，在热平衡态，流和力均为零。我们将看到，熵产生 $P = d_iS/dt$ 可以从流和力计算出来。

让我们考虑对应于化学反应的广义力的定义。回到反应 $A + X \longrightarrow Y + B$ 上来。我们已看到，在平衡态，浓度间的比率怎样由质量作用定律给出。如肖非尔 · 德 · 当德(Théophile de Donder)所指出的，可以引入一种“化学力”，即“亲和力”$\mathscr{A}$，它决定着化学反应速率的方向，就像温度梯度决定着热流方向一样。在我们所考虑的反应情形中，亲和力与 $\log K\, BY/AX$ 成正比，这里 K 是平衡常数。十分明显，在平衡态，亲和力 $\mathscr{A}$ 为零，因为这时根据质量作用定律，我们有 $AX/BY = K$。当我们

使系统离开平衡态时，亲和力将增加(绝对值)。当通过反应 $A+X \longrightarrow Y+B$ 而形成 B 分子时，如果我们把它们从系统中去掉一部分，我们就可以看出上面的结论。亲和力可以当作系统的实际状态与平衡态间的距离的度量。而且，如我们已提到的，它的符号决定化学反应的方向。如果$\mathscr{A}$是正的，那么 B 和 Y 的分子“过多”，净反应将按 $B+Y \longrightarrow A+X$ 的方向进行。反过来，如果$\mathscr{A}$是负的，B 和 Y“太少”，净反应将按相反方向进行。

我们所定义的亲和力是使炼金术士所描述的古老亲和力更加精确的一种方法，炼金术士用古老亲和力来解释化学体之间的选择关系，即分子间的“爱好”和“厌恶”。化学活性不能被归约为力学轨道，不能被归约为动力学定律的平静支配，这种思想从一开始就被强调指出。我们终于可以引用狄德罗的话。尼兹西后来在不同的场合断言，谈论“化学定律”是可笑的，似乎化学体是由一些类似于道德法的规律所统治。他抗议道：在化学中没有任何约束，每个物体高兴作什么就作什么。这不是“尊敬”的问题，而是权力之争的问题，是强者无情地统治弱者的问题。亲和力为零的化学平衡态就对应于这个矛盾的解决。按照这种观点，热力学亲和力的特殊性实际上用现代的语言重述了一个古老问题，即区分两个世界的问题，这两个世界就是动力学定律的合法和冷漠的世界与化学反应所从属的自发活性和生产活性的世界。

让我们强调一下物理学和化学在基本概念上的区别。在经典物理学中，我们至少可以想象出一些可逆过程，例如无摩擦的摆的运动。在动力学中对不可逆过程的忽视总是对应于一种理想化过程，不过，至少在某些情形中这是一种有意义的理想化。在化学中，情况就完全不同了。这里，定义化学的那些过程，即以反应速率为特征的

化学变化过程，都是不可逆过程。由于这个原因，化学不能被归约为经典力学或量子力学(在其中过去和未来起着等价作用)所据以建立的理想化。

可以预期，所有可能的不可逆过程都在熵产生中显现出来。它们中的每一个都通过其速率或流 J 与相应的力 X 的乘积而参加进来。单位时间里总的熵产生 $P = d_iS/dt$ 是这些贡献之和。它们中的每一个都通过乘积 JX 而显现出来。

我们可以把热力学分为三个大领域，对这三个领域的研究对应着热力学发展过程中的三个相继阶段。在平衡态，熵产生、流和力均为零。在近平衡态的区域，热力学力是"弱"的，速率 J_k 是力的线性函数。第三个领域被称为"非线性"区域，因为在这里，速率常是力的更为复杂的函数。让我们首先强调指出适用于近平衡态情形的线性热力学的某些一般特点。

2 线性热力学

1931 年，拉尔斯·翁萨格(Lars Onsager)* 首先发现了非平衡态热力学的一般关系，这些关系是对线性的靠近平衡态的区域而言的。这就是著名的"倒易关系"。定性地说，该关系指出：如果有一个力"1"(例如某个温度梯度)，它可以影响一个流"2"(例如某个扩散过程)，那么力"2"(某个浓度梯度)也会影响流"1"(热流)。这个关系已经得到了验证。例如，在每一个温度梯度引起物质扩散过程的情形中，我们发现浓度梯度能引起一个通过该系统的热流。

必须强调的是翁萨格关系的一般性。例如，不可逆过程究竟发生在

* 翁萨格(1903—1976)，美国物理学家，化学家，奠定了不可逆定理热力学基础，1968年获诺贝尔化学奖。——译者

气态的、液态的还是固态的媒质中,是无关紧要的。倒易表达式的有效性与任何微观假定都无关。

倒易关系已经成了不可逆过程热力学的最早的结果，表明这不是什么尚未确定好的无人之境,而是一个很有价值的研究课题,其成果之丰富可与平衡态热力学相比。平衡态热力学是十九世纪的成就,非平衡热力学是在二十世纪发展起来的，翁萨格关系就标志着人们的兴趣从平衡态转向非平衡态的转折点。

现在来说这个线性的非平衡热力学领域中的第二个一般结果。我们已经谈到过某些热力学的势,其极值相当于平衡态,即热力学变化所不可逆地趋向的态。孤立系统的熵 S 和给定温度下封闭系统的自由能 F 就是这样的势。近平衡态系统的热力学也引进了这样的一个势函数。特别值得指出的是,这个热就是熵产生 P 本身。实际上,最小熵产生原理表明了,在翁萨格关系成立的区域(即线性区域),系统朝着某个定态演变,这个定态的特征是具有和系统的外加约束相容的最小熵产生。这些约束是由边界条件确定的。例如,它们可以对应于系统中保持在不同温度上的两个点，或者对应于连续地维持一个反应并吸收其生成物的某个物质流。

于是,系统演变所趋向的这个定态就一定是个非平衡态,在这个态上发生着速率不为零的耗散过程。但是因为它是定态,所以描述该系统的所有的量,比如温度浓度,就成为与时间无关的量。同样,系统的熵现在也变成与时间无关。因此,它的时间变动量为零,即 $dS=0$。但我们已经看到熵的时间变动量是由两项组成的,即熵流 d_eS 和正的熵产生 d_iS。因此 $dS=0$ 就意味着 $d_eS=-d_iS<0$。从环境中来的热流或物质流确定了一个负的熵流 d_eS,但这个负的熵流被系统内部的不可逆过程所引起的熵产生 d_iS 抵消了。负的熵流 d_eS 说明系统向外界传输熵。因此在该

定态,系统的活动不断地增加着它周围环境的熵。对所有定态来说,这都是对的。但是最小熵产生原理还有更多的含义。系统所趋向的特殊的定态,就是向外界传导的熵小到可与外加边界条件相容的态。这样看来,平衡态就相当于边界条件允许熵产生为零时的特殊情形。换句话说,最小熵产生的理论表达了某种“惰性”。当边界条件阻止系统走向平衡态时,系统就去作次一等的最省力的事,它走向熵产生最小的态——即“尽可能”靠近平衡态的态。

因此,线性热力学描述了系统趋向于与提供给它的流相容的最小活动性的行为。这种行为是稳定的,可以预言的。像平衡态热力学一样,线性热力学可以用一个势即熵产生来描述。这个事实说明,无论在趋向平衡态的演变中,还是在趋向某个定态的演变中,初始条件都被忘却了。无论初始条件是什么,系统最终都将达到由外加边界条件所决定的态。因此,这种系统对边界条件的任何变化所作出的反应就是完全可以预言的。

我们看到,在线性区域,情况仍和在平衡态时基本一样。虽然熵产生不为零,但也无法阻止人们把不可逆的变化看作是趋向于某个完全可从一般定律推出的态的演变。这个“演化”不可避免地导致任何差别、任何特殊性的消灭。是卡诺呢,还是达尔文呢?我们在第四章提到过的佯谬依然如故。一方面是自然的有组织的形式在出现,另一方面是“忘却”初始条件的趋势,同时产生出无组织性,这两者之间仍然没有任何联系。

3 远离平衡态

在非线性热力学的根基上有着某种非常惊人的东西,首次看上去像是一种失败:尽管付出了巨大的努力,对于流不再是力的线性函数的

那些系统，最小熵产生原理的一般化几乎是不可能的。在远离平衡态处，系统依然可能进化到某个定态，但一般来说这个态不再以某个适当选择的势(比如对近平衡态而言的熵产生)为特征。

由于缺乏某个势函数，产生了一个新问题：对于系统进化所趋向的那些态的稳定性，我们能够说些什么呢?事实上，只要吸引中心态是用某个势(如熵产生)的最小值来定义的，那么它的稳定性就是有保证的。的确，涨落有可能使系统偏离这个最小值，但是热力学第二定律能强制它回到吸引中心态。因此，系统对于涨落是有“免疫力”的。由此，只要我们确定出一种势，我们便是在描述一种“稳定世界”，在其中，系统的进化将把它们引到一个静止的情形，而这种静止情形一旦建立，便永远继续下去。

然而，当作用于一个系统的热力学力变得超过线性区域时，该定态的稳定性，或它对涨落的独立性，便不再有保证。稳定性不再是物理学一般定律的结果。我们必须考查某个定态对由系统或系统环境所产生的不同类型涨落的反应方式。在某些情形，这种分析引出如下结论：某个态是“不稳定”的，在这样的态，一定的涨落不是在衰减下去，而是可能被放大，而且影响到整个系统，强迫系统向着某个新的秩序进化，这新的秩序和最小熵产生所对应的定态相比，在性质上可能是完全不同的。

热力学导出了与能够摆脱支配着平衡态的那种类型的秩序的系统有关的最初的一般结论。这些系统一定是“远离平衡态”的。在不稳定可能存在的情形，我们必须确定一个阈值，即与平衡态的距离，在该阈值上涨落可能引出新的状态，不同于那作为平衡态或近平衡态系统之特征的“正常”稳定状态。

为什么这一结论如此令人感兴趣呢?

这种类型的现象在流体动力学及液体流动的领域中是人们熟知的。例如,人们早就懂得,一旦达到某个流速,流体中就会出现湍流。米歇尔·塞利最近回顾道,早期原子论者特别关心湍流,以致看来完全有理由把湍流看成是启发卢克莱修物理学的一个基本源泉。卢克莱修写道,有时候,在一些不确定的时间和地点,永恒而普遍存在的原子的降落被某一个十分轻微的偏差(即"趋向")干扰,所形成的涡旋便产生了世界,产生了一切自然物。这个自发的和不可预言的偏差(即"趋向")经常被批判为卢克莱修物理学的主要弱点之一,说它是被特别引入的某种东西。事实上,其对立面是对的——这趋向想要解释如片流不再是稳定的,且自发地变成湍流那样的事件。今天,流体力学的专家们引入了一种微扰来检验流体流动的稳定性,这种微扰表达了分子无序性加到平均流动上去所产生的效果。我们距离卢克莱修的"趋向"不甚遥远了。

在一段很长的时期中,湍流被视为与无序或噪声等同。今天我们知道并非如此。事实上,湍流运动在宏观上看是无规则的或混沌的,但在微观上看则相反是高度有组织的。湍流中所涉及的多重空间和时间尺度对应着亿万分子的相干行为。这样看来,从片流到湍流的过渡是一种自组织的过程。在片流中属于分子热运动的那部分系统能量逐渐被传递给宏观有组织的运动。

所谓"贝纳德不稳定性"是一种产生出自发自组织现象的定态的不稳定性的另一个突出例子。这种不稳定性出自在水平液层中建立的垂直的温度梯度。液层的下表面被加热到高于上表面温度的某一给定温度。作为这些边界条件的结果,建立了从底到顶的持续热流。当所建立的梯度达到某个阈值时,液体的静止状态(即热量只靠传导而不靠对流传输的定态)变为不稳定的。相应于分子系统相干运动的对流产生了,增

加了热量传输的速率。因此，对于给定的约束值(温度梯度)，系统的熵产生增加了，这一点和最小熵产生定理是矛盾的。贝纳德不稳定性是一个引人注意的现象。所得到的对流运动实际上来自系统复杂的空间组织。数以百万计的分子协调一致地运动，形成了具有某个特征尺寸的六角形对流格子。

我们在第四章中介绍过玻耳兹曼的有序性原理，该原理把熵和由配容数 P 所表达的概率关联起来。此处我们能否应用这个关系呢?对于分子的每一种速度分布，都有一个配容数与之对应，这个数代表着我们能够对每个分子赋予一个速度从而实现该速度分布的方式的数目。论证和第四章中所作的类似，那里，我们曾用分子在两个盒子间的分布来表达配容数。这里，只要处于无序，即速度有一个很宽的散布，则配容数也是个很大的数。但是，相干运动表明大量分子以近乎一样的速度运动(即速度的分散性很小)。对于这样的分布，相应的配容数 P 将是很小的，以致几乎不可能发生自组织的现象。然而却发生了!由此，我们看到，计算配容数(这就必须假设每个分子态都具有相等的先验概率)是误入歧途的。显然，新状态的产生与这种计算无关。就贝纳德不稳定性来说，这种状态是涨落，即微观的对流，按照玻耳兹曼的有序性原理，它将逐渐衰退下去，但是相反，涨落被放大了，直至侵入整个系统。超过给定梯度的临界值后，一种新的分子秩序自发地产生出来。它相当于通过与外部世界交换能量而达到稳定的一种巨型涨落。

在远离平衡态的条件下，作为玻耳兹曼有序性原理的基础的概率概念不再成立，即我们观察到的结构不再与配容数的最大值相对应。它们也不可能与自由能 $F=E-TS$ 的最小值有关。趋向于均匀和忘却初始条件的倾向不再是一般的性质。在这样的情况下，有关生命起源的古

老问题就以一种不同的景象表现出来。可以肯定，生命和玻耳兹曼的有序性原理是不相容的，但和在远离平衡态的条件下可能出现的那种状态并非是不相容的。

经典热力学导出了“平衡结构”的概念，例如晶体。贝纳德格子也是结构，但具有完全不同的性质。这就是为什么我们要引入“耗散结构”概念的原因。我们为的是强调在这样的情形中，一方面是结构和有序，另一方面是耗散或消费，这两者之间有着初看上去是悖理的密切联系。我们已在第四章中看到，在经典热力学中，热的传输被认为是一个浪费的源泉。但在贝纳德格子中，热的传输变成了一个有序的源泉。

这样看来，一个系统与外部世界的相互作用，它的嵌入非平衡条件之中，可能成为形成物质的新动力学态——耗散结构的起点。耗散结构实际上相当于一种超分子组织的形式。虽然描述晶体结构的参数可以从组成它们的分子的性质中导出，特别是可以从这些分子间的引力和斥力的范围中导出，但贝纳德格子和一切耗散结构一样，主要是产生它们的那个全局性非平衡状况的一种反映。描述它们的那些参数是宏观的，它们不是像晶体分子间距离那样具有 10^{-8} 厘米的数量级，而是具有厘米的数量级。同样，时间的尺度也是不同的，它们不是和分子的时间(如某种分子的振荡周期可能为 10^{-15} 秒左右)相对应，而是和宏观的时间相对应，如数秒、数分钟或数小时。

让我们回到化学反应的情形，这里和贝纳德问题的情形有几点基本的区别。在贝纳德格子的情形中，不稳定性具有简单的机械根源。当我们从下面加热液层时，液体的较低部分密度减小，重心升高。因此，在超过某个临界点后系统倾斜而发生对流就不足

为怪。

但在化学系统中却不存在这种类型的机械特点。我们能否期望某种自组织的过程呢？我们头脑中对化学反应的想象是一些通过空间而加速的分子，这些分子以混沌的方式随机地碰撞着。这样的想象没有给自组织留下任何余地，这也许就是为什么化学不稳定性只是到了最近才成为人们感兴趣的课题的原因之一。这里还有另一个区别：当与平衡态的距离“足够”大(阈值由雷诺数这样的无量纲数来量度)时，一切流动都变成湍流。但对化学反应而言，这并不成立。远离平衡态是必要条件，但不是充分条件。对于许多化学系统，无论所加的约束是什么，无论产生的化学变化的速率如何，定态仍然是稳定的，任意涨落将被阻尼，就像在近平衡态范围内的情形一样。特别是对具有 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \cdots$ 这样的一列变化的系统 (它们可以用线性微分方程来描述)，这一点是成立的。

因此，扰动一个化学系统的那些涨落的命运如何，以及该系统可能进化到的新状况的形式如何，便取决于化学反应的具体机制。与接近平衡态的情况不同，远离平衡态的系统的行为变得十分特殊。不再存在任何普遍有效的定律使我们能从中推演出系统的总的行为。每个系统都是一种独特的情况，每一组化学反应都必须加以研究，每一组化学反应都可能产生出一种性质上与众不同的行为。

尽管如此，还是得到过一个一般结果，就是化学不稳定性的一个必要条件：在系统中发生的一列化学反应里，惟一可能在一定的条件下和环境中破坏定态稳定性的反应阶段就是“催化环”，在这种反应阶段，反应生成物被卷入它自身的合成过程之中。这是一个使人感兴趣的结论，因为它使我们更加接近现代分子生物学的一些基本成就(见图 4)。

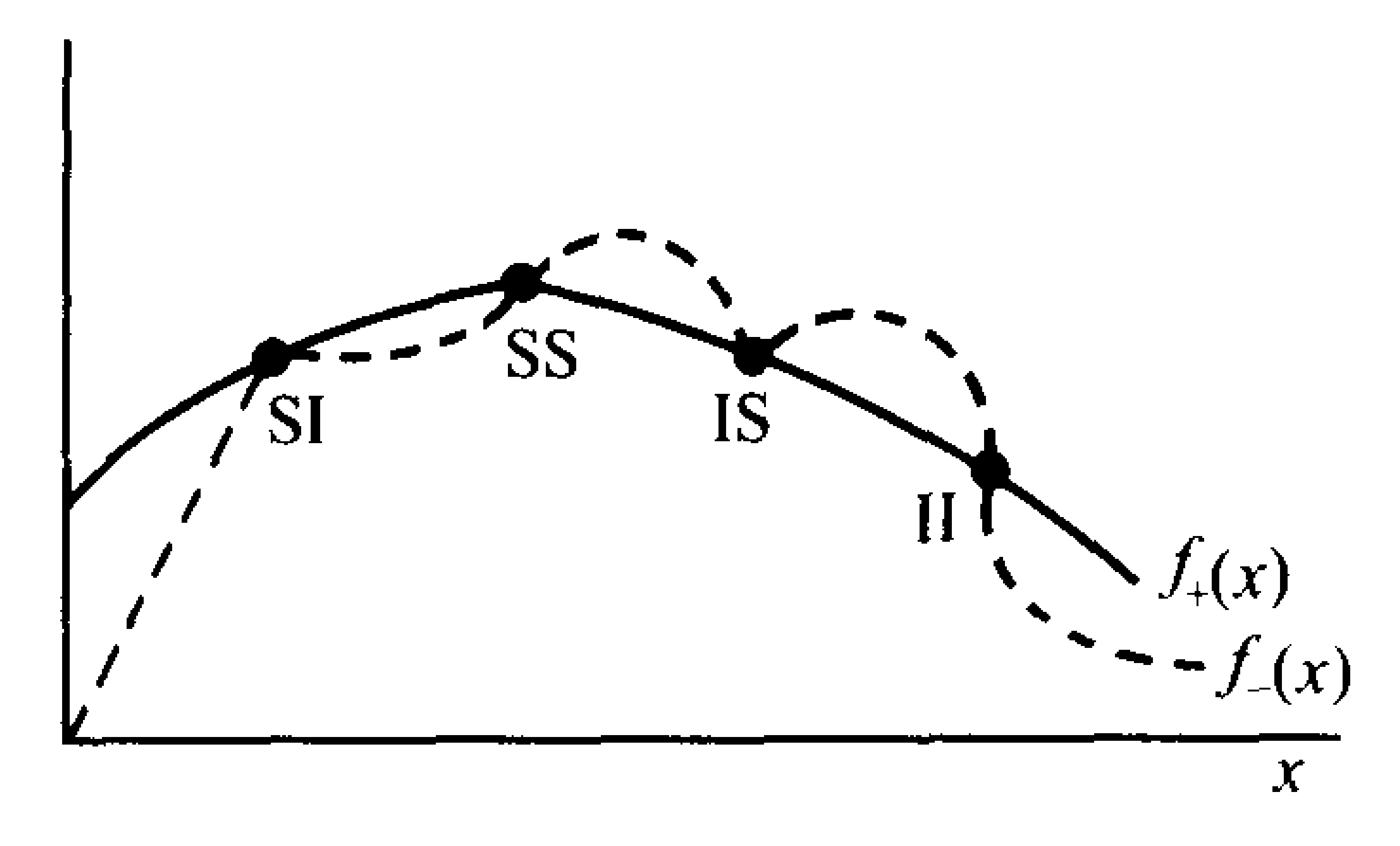


图 4　与非线性项相对应的催化环

在具有一个独立变量的问题中，这意味着至少有一项，其中该独立变量出现且幂次大于 1；在这种简单的情形中，容易看出这种非线性项和定态的潜在不稳定性之间的关系。

令独立变量 X 的时间变化率为 $dX/dt=f(X)$。总可以把 $f(X)$ 分解为两个函数，相应于增益 $f_+(X)$ 和损耗 $f_-(X)$，它们都是正的或者是 0，因此 $f(X)=f_+(X)-f_-(X)$。这样，定态($dX/dt=0$)就对应于使 $f_+(X)=f_-(X)$ 成立的各值。

这些态在图中由 f_+ 和 f_- 两条曲线的交点给出。如果 f_+ 和 f_- 都是线性的，则只可能有一个交点。在其他情形中，交点的类型使我们可以推断该定态的稳定性。

可能有 4 种情形：

SI：对于负涨落是稳定的，对于正涨落是不稳定的：如果系统稍稍向左偏离 SI，则 f_+ 与 f_- 之间的差为正，结果将减少偏离使系统回到 SI；如果偏离是在右方，则将被放大。

SS：对于正的和负的涨落都是稳定的。

IS：只对正涨落是稳定的。

II：对正涨落和负涨落都是不稳定的。

4　在化学不稳定性的阈外

今天，对化学不稳定性的研究是很普遍的，无论理论方面还是实验方面的工作，正在大量的研究单位和实验室中进行着。事实上将越来越清楚，这些研究使范围广泛的科学家们都感兴趣，他们不仅包括数学家、物理学家、化学家和生物学家，而且包括经济学家和社会学家。

在远离平衡的条件下，在化学不稳定性的阈外，出现了各种各样的新现象。为了以一种具体的形式去描述这些新现象，可以从一个简化的理论模型出发，这就是过去十年来在布鲁塞尔开发出来的模型。美国科学家把这个模型叫做“布鲁塞尔器”，这个名称已被用在科学文献中(地理上的联系看来已成为这个领域中的规则，除了布鲁塞尔器外，还有一个

"俄勒冈器",最近还有一个"帕罗阿尔顿器")。让我们简要地叙述一下布鲁塞尔器。与不稳定性有关的几个步骤已被注意过了(见图 3)。从 A 合成 X,X 进而分解为 E,生成物 X 与一个交叉催化关系相联而生成 Y。X 在一个三分子步骤中由 Y 生成,但反过来,X 和 B 的反应又合成 Y。

在这个模型中,生成物 A,B,D 和 E 的浓度是给定的参量(即"控制物质")。当 A 保持不变,同时增加 B 值时,我们探讨该系统的变化。该系统可能达到的定态(即 $dX/dt=dY/dt=0$ 的态)相应于浓度 $X_0=A$ 和 $Y_0=B/A$。这一点很容易得到验证,只要写出动力学方程并寻求定态解。但是,一旦 B 的浓度超过某一临界值(所有其他值均维持不变),该定态就不再是稳定的。在达到临界值之后,该定态变成一个不稳定的"焦点",系统离开此焦点而达到一个"极限环"(参阅图 5)。

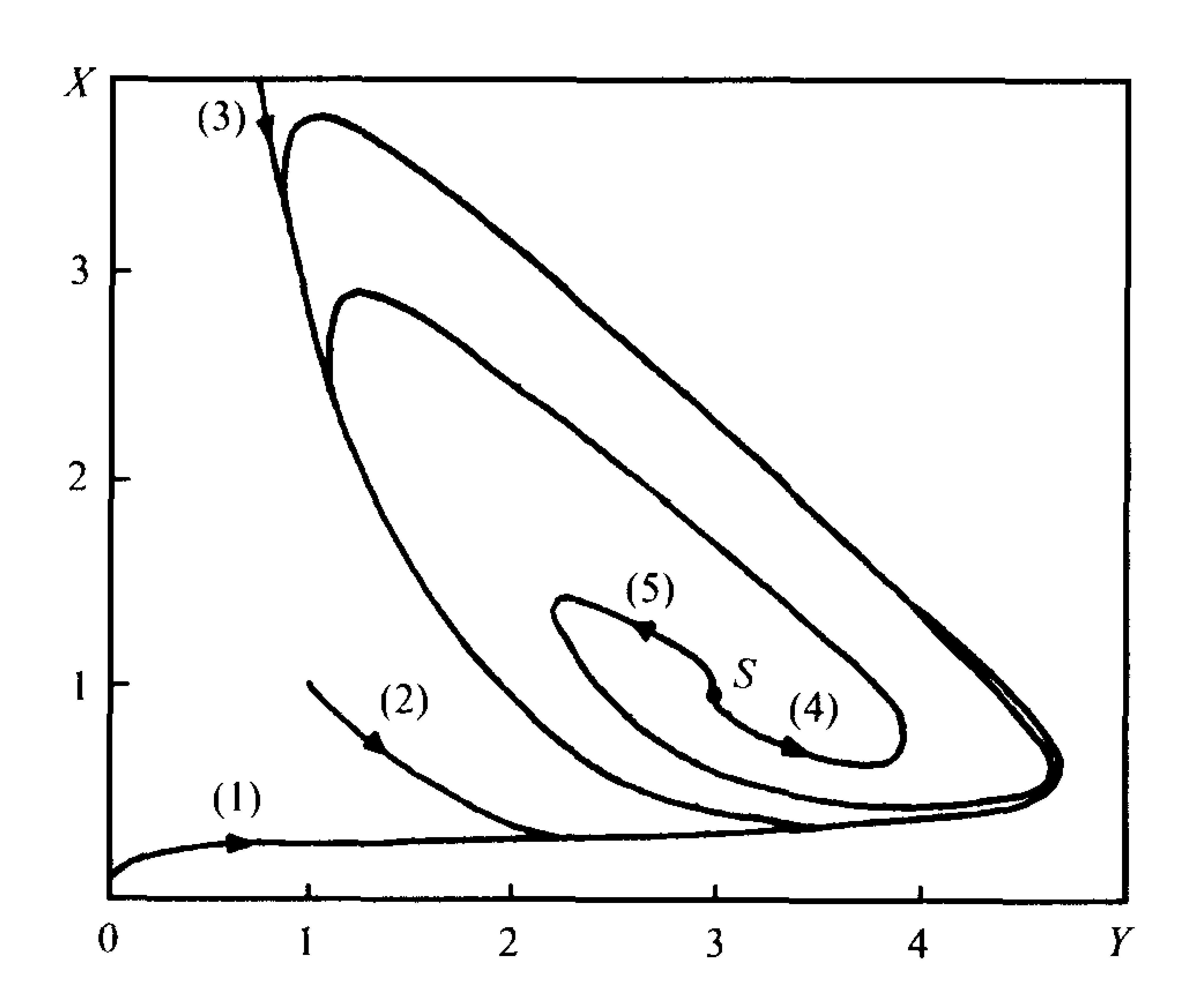


图 5 代表组分 X 的浓度与组分 Y 的浓度的关系的示意图

环的焦点(即点 S)是定态,当 $B>1+A^2$ 时它是不稳定的。所有的轨道(图中画出 5 条),无论它们的起始状态是什么,都导向同一个环。

X和Y的浓度不再保持稳定，而是开始以一个完全确定的周期振荡起来。振荡的周期既与确定反应速率的动力常数有关，又与加在整个系统上的边界条件(A,B的温度、浓度等)有关。

在临界阈外，系统因涨落而自发地离开定态$X_0=A$，$Y_0=B/A$。无论初始条件如何，它都达到极限环，此时周期的变化是稳定的。因此我们得到一个周期性的化学过程——一个化学钟。让我们暂停一下，来强调这种现象多么出乎意料。假设我们有两种分子，一种是“红的”，一种是“蓝的”。由于分子的混乱运动，我们可以指望在给定瞬间有比较多的红色分子位于比如说容器的左半部。过一小会儿，有较多的蓝色分子出现，如此等等。这容器对我们来说将呈现“紫色”，并偶然而不规则地闪现红色或蓝色。但是，化学钟并不是如此。在这里，系统完全是蓝色的，然后，它突然把颜色改变为红色，然后，又改变为蓝色。因为所有这些改变都以有规则的时间间隔发生，所以我们得到的是一个相干的过程。

这种从亿万分子的活动中产生的有序度似乎是难以相信的，而且假如化学钟没有被观察到的话，确实谁也不会相信这种过程会是可能的。为了在一瞬间改变颜色，这些分子必须具有一种“通信”的手段。系统必须作为一个整体来活动。我们将反复回到通信这个关键字上来，其明显的重要性表现在如此众多的领域中，从化学到神经生理学。耗散结构很可能为通信引入了一种最简单的物理机制。

在最简单类型的机械振荡器即弹簧和化学钟之间，存在着一种令人感兴趣的区别。化学钟有完全确定的周期，与它的轨道所遵循的极限环相应。相反，弹簧有一个与振幅有关的频率。按照这个观点，化学钟作为一种计时器要比弹簧更加可靠。

但化学钟并非自组织的惟一形式。直到现在为止，扩散一直是被忽略了的。所有物质都被假定是均匀分布在反应空间中的。这是一种理想化；小

的涨落将总会引起浓度差，因而引起扩散。因此，我们必须在化学反应方程中加上扩散。布鲁塞尔器的扩散反应方程显示出适用于这种系统的惊人的变化范围。事实上，系统在平衡态和近平衡态保持着空间上的均匀性；而在远离平衡态的区域，化学品在整个系统中的扩散可能引起新型的不稳定性，这种新型的不稳定性包括打破初始空间对称性的涨落的放大。这样，时间振荡即化学钟就不再是系统可能具有的耗散结构的惟一形式。例如，和化学钟很不一样的振荡也会发生，这种振荡同时与时间及空间这两者有关。它们相应于周期地通过该系统的X和Y浓度的化学波(参阅图6)。

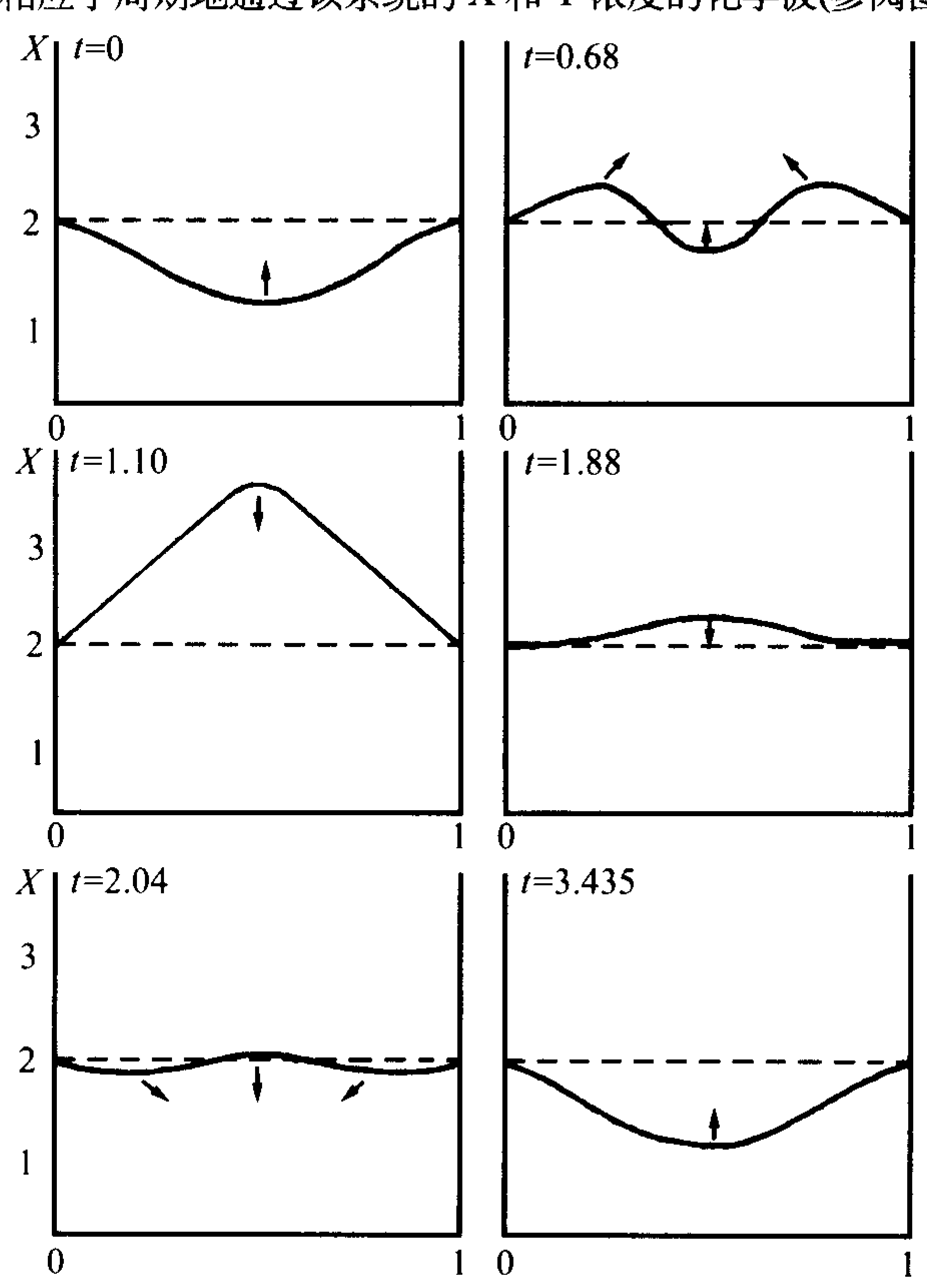


图6　在计算机上模拟的化学波

在“布鲁塞尔器”三分子模型中组分 X 的浓度的空间轮廓变化的各相继步骤。当时间 $t=3.435$ 时，我们恢复到和 $t=0$ 时同样的分布。A 和 B 的浓度为 2 和 5.45 ($B>1+A^2$)。X 和 Y 的扩散系数为 8×10^{-3} 和 4×10^{-3}。

此外，特别是当 X 和 Y 的扩散常数值彼此很不相同时，系统可能显示出一种稳定的、与时间无关的变化，而且一些稳定的空间结构可能出现。

这里我们必须又一次暂停下来，这次是要强调空间结构的自发形成与平衡态物理学定律以及玻耳兹曼有序性原理的矛盾有多么大。我们又一次看到，与这种结构对应的配容数比起均匀分布时的配容数来特别地小。但是，非平衡过程还是能导致那些从经典的观点看来不可能出现的情形。

当此问题不是在一维而是在二维或三维的情形中研究时，与一组给定的边界条件相容的不同耗散结构的数目可能还会进一步增多。例如，在一个圆的二维空间中，空间结构的定态可能以出现某个独特的轴为特征(参阅图 7)。

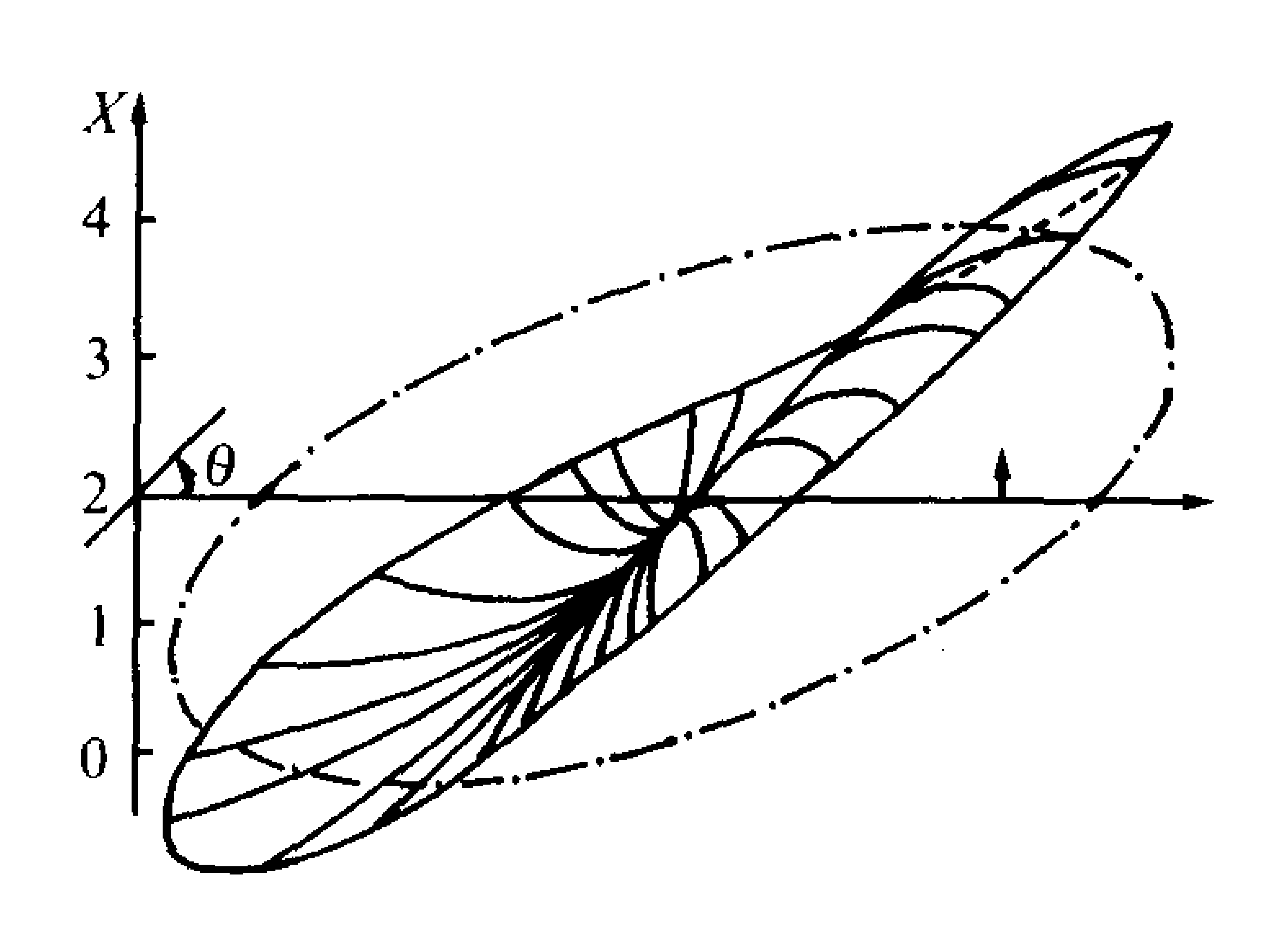


图 7 用计算机模拟出的带有独特轴的定态

X 的浓度是水平面上几何坐标 ρ 和 θ 的函数。施加在均匀非稳解 (X_0, Y_0) 上的扰动的位置用一个箭头标出。

这相当于一种新的、引起极大兴趣的对称破缺过程，当我们回忆起胚胎的形态发生的最初阶段之一就是在系统中形成一个梯度时，尤其是如此。我们将在本章稍后以及在第六章再回到这些问题上来。

到现在为止，我们始终假定“控制物质”(A, B, D 和 E)在整个反应

系统中是均匀分布的。如果放弃这个简化，新的现象就会发生。例如，系统具有“自然尺寸”，它是描述该系统的参数的函数。这样，系统便决定了它自己的固有尺寸——就是说，它确定了具有空间结构的或被周期浓度波所跨越的区域。

这些结果还给出了一个极不完整的图画，去描述远离平衡时可能发生的各种不同的现象。让我们首先指出远离平衡多重态的可能性。对于给定的边界条件，可能出现不止一个定态。例如，一个是富含化学品 X 的态，另一个是 X 贫乏的态。从一个态向另一个态的转移在控制机制中起着重要作用，像在生物系统中所描述的那样。

自从李雅普诺夫*和彭加勒的经典著述发表以来，诸如焦点那样的特征点或诸如极限环那样的线，是数学家们熟知的稳定系统的“吸引子”。新的事情是把它们用于化学系统。值得注意的是，有关反应扩散系统不稳定性的第一篇文章是图灵在1952年发表的。最近几年，新型的吸引子已被找到。仅当独立变量的数目(在布鲁塞尔器中有两个独立变量，即变量 X 和 Y)增加时，它们才会出现。特别是，我们可以得到一些“奇异吸引子”，它们并不与周期变化相对应。

图8概括了郝柏林作出的一些计算。该图给出这种非常复杂的吸引子曲线的一个概念，这些曲线是为一个模型计算的，该模型通过从外面增加 X 的周期性供应，而把布鲁塞尔器加以推广。引人注目的是，我们描述过的大多数可能性已在无机化学中和若干生物学情形中被观察到。

在无机化学中，最著名的例子是20世纪60年代初期发现的别罗索夫-扎鲍廷斯基反应。相应的反应模式，即诺依斯及其同事引入的俄勒冈器，基本上和布鲁塞尔器相似，但要更复杂一些。别罗索夫-扎鲍廷

* 李雅普诺夫(1857—1918)，俄国数学家，力学家。——译者

斯基反应就是一种有机酸(丙二酸)在有适当的催化剂如铈、锰或试亚铁灵等存在时被溴酸钾氧化(参阅图 9)。

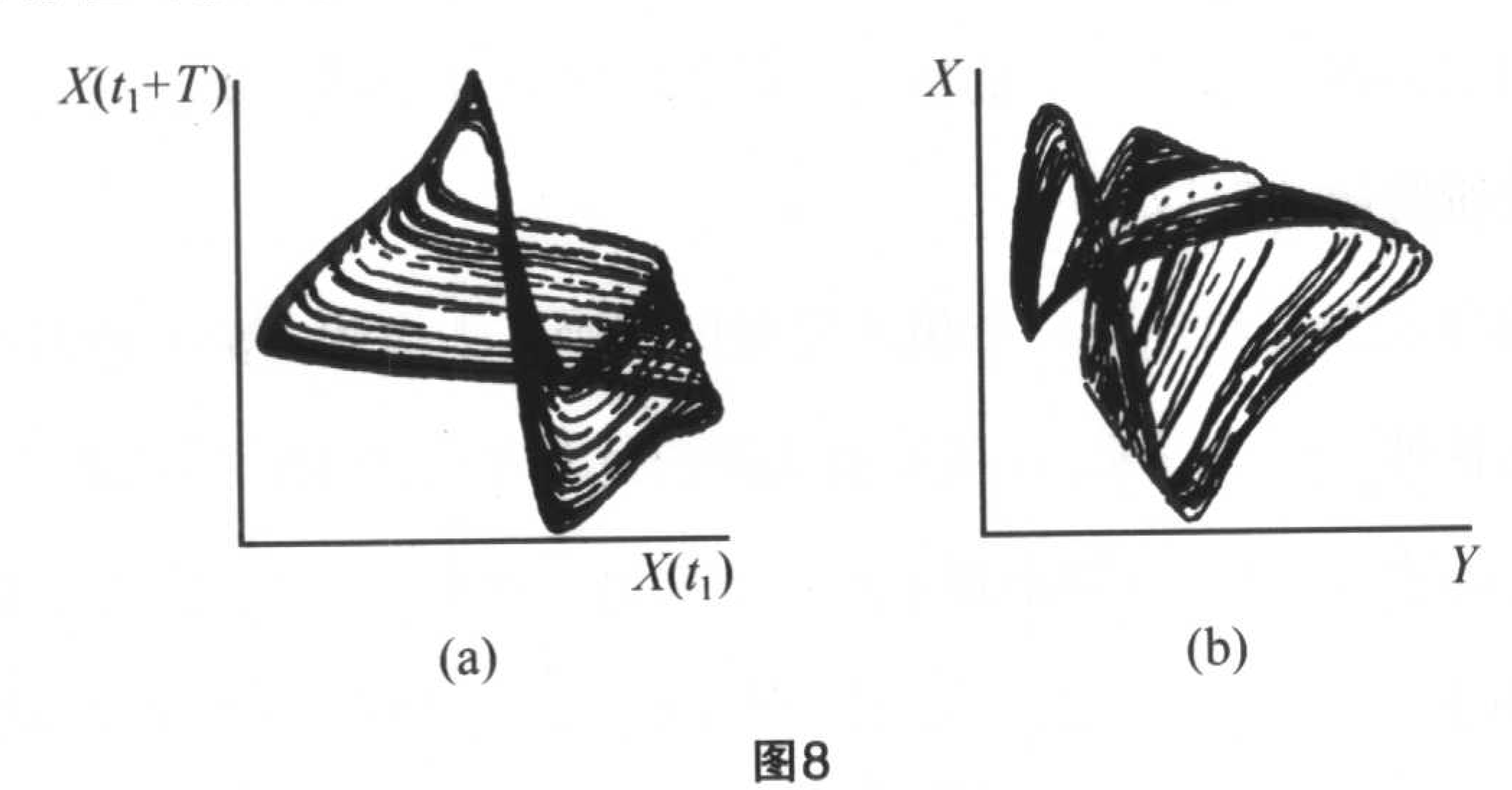


图8

(a)别罗索夫-扎鲍廷斯基反应中在时刻 t_1 和 t_1+T 的溴离子浓度。(参阅 R. H. Simoyi, A. Walf 和 H. L. Swinney, *Physics Revicw Letters*,第 49 卷(1982),第 245 页;又见 J. Hirsch 的"Condensed Matter Physica"和论计算机,*Physics Today*(1983 年 5 月),第 44—52 页)

(b) 郝柏林为周期性地从外面供给组分 *X* 的布鲁塞尔器计算的吸引子曲线 (见私人通信)。

可以创造各种不同的实验条件,以便在同一系统内给出不同的自组织形式——化学钟,稳定的空间分化,或形成越过宏观距离的化学活性波。

现在让我们转到最使人感兴趣的事情:这些结果与理解生命系统的关系。

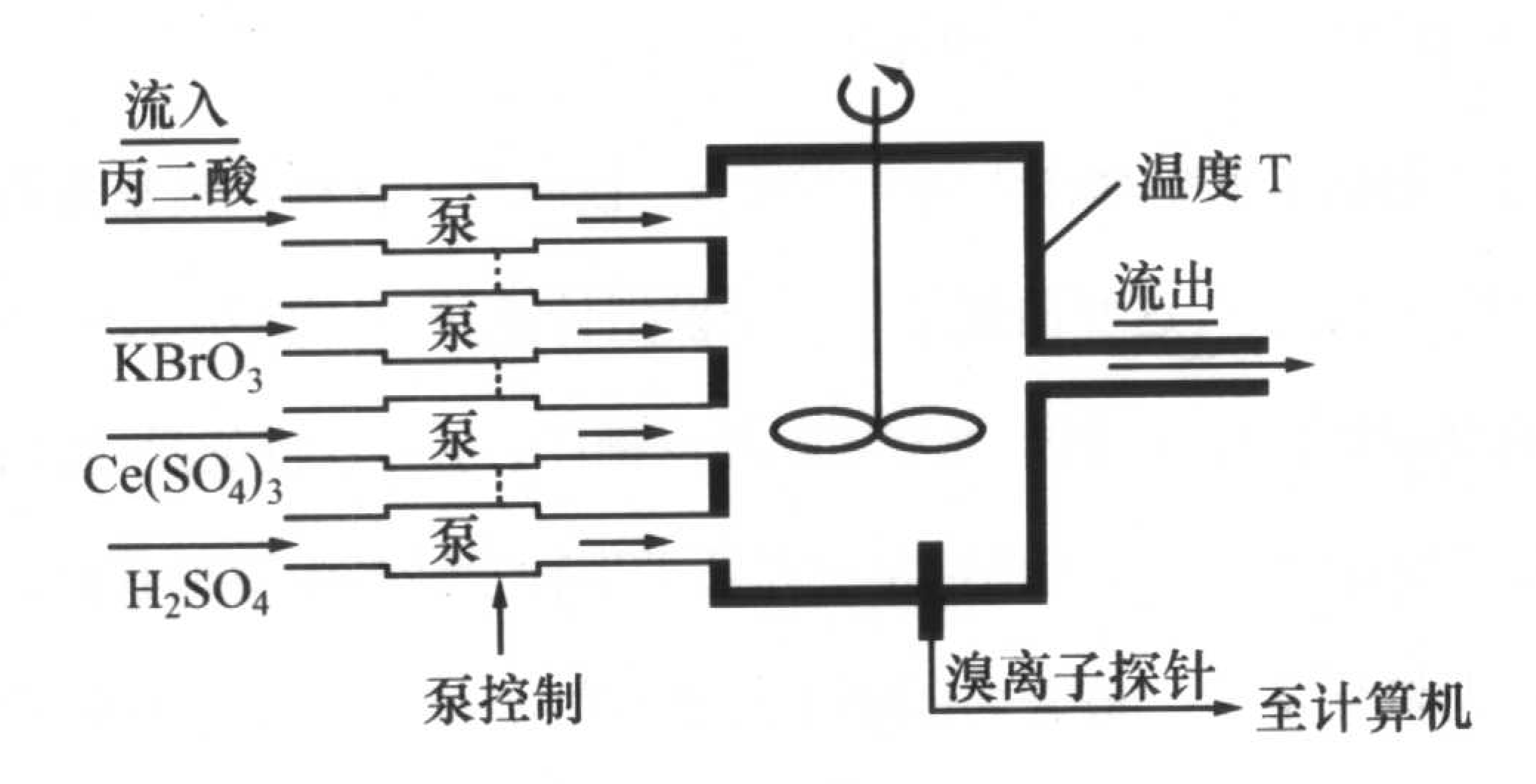


图 9 用来研究别罗索夫－扎鲍廷斯基反应中的振荡的一种化学反应器的示意图

反应器中有一个搅拌器,用以保持系统的均匀。该反应有三十多种生成物和中间产物。不同反应路径的变化取决于由泵控制的入口(以及其他因素)。

5 和分子生物学相遇

在本章的开头部分我们证明了，在远离平衡的条件下，可能发生各种不同类型的自组织过程。它们会导致出现化学振荡或空间结构。我们已经看到，出现这种现象的基本条件就是存在催化效应。

虽然“非线性”反应的结果(生成反应产物)对反应的“原因”有一个反馈作用，且在无机世界中比较罕见，但分子生物学却已发现，在谈及生命系统时，这些结果在实际上是一个惯例。自催化(X的存在加速其自身的合成)、自阻化(X的存在阻止合成它所需的催化)和交叉催化(属于两个不同反应链的两种产物各自促进对方的合成)提供了经典的调节机制，以保证代谢机能的连贯进行。

让我们强调指出一种使人感兴趣的差别。在无机化学中人所共知的例子里，所涉及的分子是简单的，但反应机制是复杂的——在别罗索夫-扎鲍廷斯基反应中可以区分出约三十种化合物。相反，在我们的许多生物学例子里，反应模式是简单的，但分子(蛋白、核酸等)是极为复杂和特殊的。这一点不大会是偶然的。这里，我们遇到了一个基本要素，它标志出物理学和生物学之间的区别。生物系统是**有过去**的。组成生物系统的分子都是某种演化的结果；它们被选择出来参与自催化机制，从而生成自组织过程的极特殊的形式。

代谢活化和阻化网络的描述是理解生物系统机能逻辑的基本步骤。这包括在需要的瞬间对合成进行触发，而对那些有未用产物在细胞中积累起来的化学反应则阻止其进行。

分子生物学借以解释基因信息的传播和利用的那个基本机制自身便是一个反馈环，一个“非线性”机制。脱氧核糖核酸(DNA)以顺序方式包含着所有用来合成为构成细胞并使其有机能所必需的各种基本蛋白

质的一切信息，它参与一系列的反应，在反应期间，这些信息被翻译成不同蛋白质序列的形式。在这些合成的蛋白质中，某些酶具有一种反馈作用，这反馈作用不仅促进或控制着不同的变化阶段，而且促进或控制着 DNA 复制的自催化机制，由此，基因信息以细胞繁殖的同一速率被复制。

这里，我们得到一个值得注意的事例，即两种科学的靠拢。此处得出的认识要求物理学和生物学作互补的发展，前者要向复杂的方向发展，后者要向基本的方向发展。

确实，从物理学的观点出发，我们现在研究的是一些“复杂”的情形，它们距离那些可以用平衡态热力学来描述的理想情形很遥远。在另一方面，分子生物学在为生命结构和数目相对地少的基本生物分子建立联系方面获得了成功。在研究化学机制的多样性时，它发现了代谢反应链的复杂性，发现了控制、阻化、激活各种酶的催化机能的精巧而复杂的逻辑，而这些酶是和每个代谢链的关键步骤相联的。这样，分子生物学为在远离平衡条件下可能发生的不稳定性提供了微观基础。

从某种意义上说，生命系统就像是一个组织得非常好的工厂：一方面，它们是多重化学变化的场所；另一方面，它们提供了一个不寻常的“空-时”组织，其生物化学物质的分布是极不均匀的。现在我们可以把功能和结构联系起来了。让我们简要地考察两个例子，这两个例子在过去几年中经过了广泛的研究。

首先，我们考虑糖酵解。这是一个代谢反应链，在反应中，葡萄糖被分解，富能物质 ATP(三磷酸腺苷)被合成出来，提供了所有活细胞所共用的基本能源。对于每个被分解的葡萄糖分子，两个 ADP(二磷酸腺苷)分子转变成两个 ATP 分子。糖酵解提供了一个很好的例证，说明生物学

的解析方法和对远离平衡条件下稳定性的研究是怎样互相补充的。

一些生物化学实验已经发现，在与糖酵解循环有关的浓度方面存在着时间性的振荡。已经表明，这些振荡是由该反应序列中的一个关键步骤，即被ADP激活并被ATP阻止的步骤决定的。这是一个典型的非线性现象，非常适合于调节代谢机能。事实上，每当细胞从其储备中吸取能量时，它正是在利用磷酸键，且ATP被转变为ADP。于是，ADP在细胞内部积累时，能量消耗加强，必须补充其储备。另一方面，ATP的积累说明葡萄糖可能以较慢的速率被分解。

对这一过程的理论研究表明，这个机制确实能够产生某种振荡现象，即化学钟。理论上算出的产生振荡所需的化学浓度值和循环的周期与实验数据是一致的。糖酵解振荡产生出对所有细胞能量过程的调制，这些能量过程与ATP的浓度有关，因而也与大批的其他代谢链有间接的关系。

我们可以更进一步去表明，在糖酵解的路径中，受到几种关键酶控制的反应是在远离平衡的条件下。这样的计算已由本诺·赫斯(Benno Hess)作出报告，且自此以后被推广到了其他系统。在通常条件下，糖酵解循环对应于一个化学钟，但改变这些条件时，可以形成一些空间花纹，它们与现有理论模型的预言完全一致。

从热力学的角度来看，生命系统是十分复杂的。某些反应是近于平衡态的，其他的反应不是。并非生命系统中的每个事物都是"活"的。穿过生命系统的能流有点类似于河流，它一般说来是平稳的，但不时地跌落，形成瀑布，因而释放出它所含有的部分能量。

让我们考虑另一个生物学过程，该过程也被从稳定性的角度研究过：粘菌的聚集，即集胞粘菌目阿米巴(*Dictyostelium discoideum*)的聚集。这一过程是出现在单细胞生物学和多细胞生物学边界上的一种有

趣的情形。当这些阿米巴生活和繁殖的环境变得缺乏营养时,它们经受了一个惊人的变化(见图 10A)。这些阿米巴起初作为一群孤立的细胞,随后联合起来,形成了一个由几万细胞组成的团块。然后这个“假合胞体”经受分异,始终变化着形状。一只“脚”形成了,它由约三分之一的细胞组成,并包含丰富的纤维素。这只脚支撑着一个圆形芽孢团块,这些芽孢将使自身分离并伸展,只要遇到合适的营养媒质,它们便迅速繁殖,并因而形成一个新的阿米巴群体。这是一个适应环境的惊人的例子。群体在一个区域内生活,直到耗尽可用的资源为止。然后,它经过变态,从而取得能动性,去侵入其他环境。

细胞粘菌的聚集 为在化学钟起着根本作用的生物系统中的自组织现象提供了一个特别引人注目的例子。见图 10A。

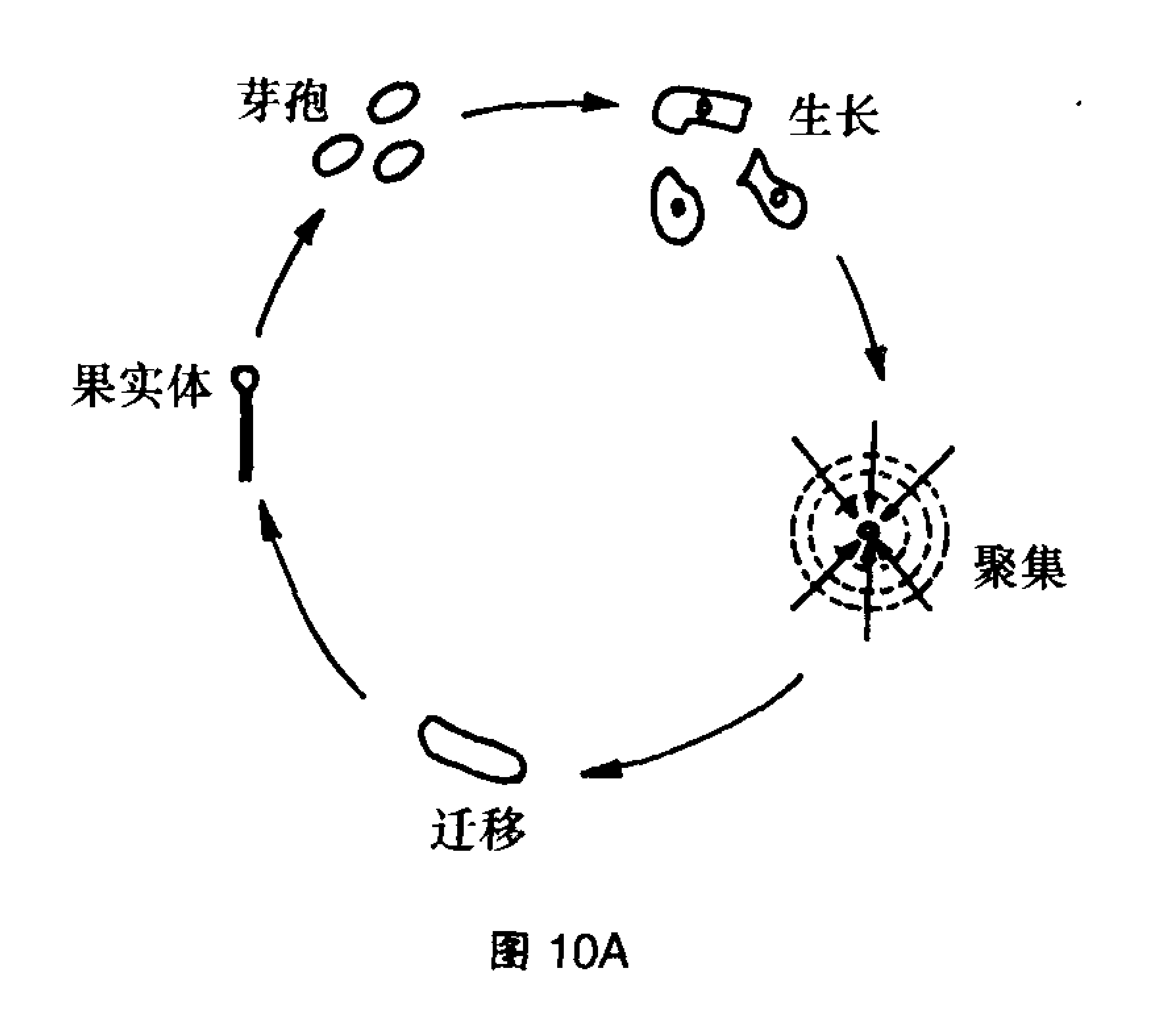


图 10A

阿米巴出自芽孢,作为单细胞的有机体而生长和繁殖。这一情形一直延续到主要由细菌提供的食物变得缺乏时为止。然后,这些阿米巴停止再生,并进入一个中间阶段,这阶段持续约 8 小时。在这时期的末尾,这些阿米巴开始在作为聚集中心的一些细胞的周围聚集起来。这个聚

集的发生是由于响应那些中心所发出的趋化信号。这样形成的聚集体开始迁移,直到形成果实体的条件得到满足时为止。然后,细胞团块分化,形成一个由芽孢团块盖顶的茎状物。

在集胞粘菌目阿米巴那里,聚集是以周期方式进行的。聚集过程的影片表明存在着阿米巴向中心移动的同心波,周期为数分钟。趋化因素的本质是人们熟知的:这就是环状 AMP(cAMP),这是包含在许多生物化学过程(如激素调节过程)中的一种物质。聚集中心以周期的方式发出 cAMP 信号。其他细胞对此作出响应,向中心移动,且把信号转发到聚集区域的周边。趋化信号转发机制的存在使得每个中心能控制大约 10^5 个阿米巴的聚集。

对一个聚集过程模型的分析揭示出存在两类分叉。首先,聚集本身代表了一种空间对称的破缺。第二种分叉则打破了时间的对称性。

起初,阿米巴是均匀分布的。当它们当中的某些开始分泌趋化信号时,cAMP 的浓度便呈现一些局部涨落。对于系统某一参数的临界值(cAMP 的扩散系数,阿米巴的能动性等),涨落被放大了:均匀的分布变得不稳定,阿米巴向着空间的不均匀分布演变。这新的分布相当于阿米巴在聚集中心周围的积累。

为理解集胞粘菌目阿米巴聚集的周期性的根源,必须研究趋化信号的合成机制。在实验观察的基础上,可以用图 10B 来描述这一机制。

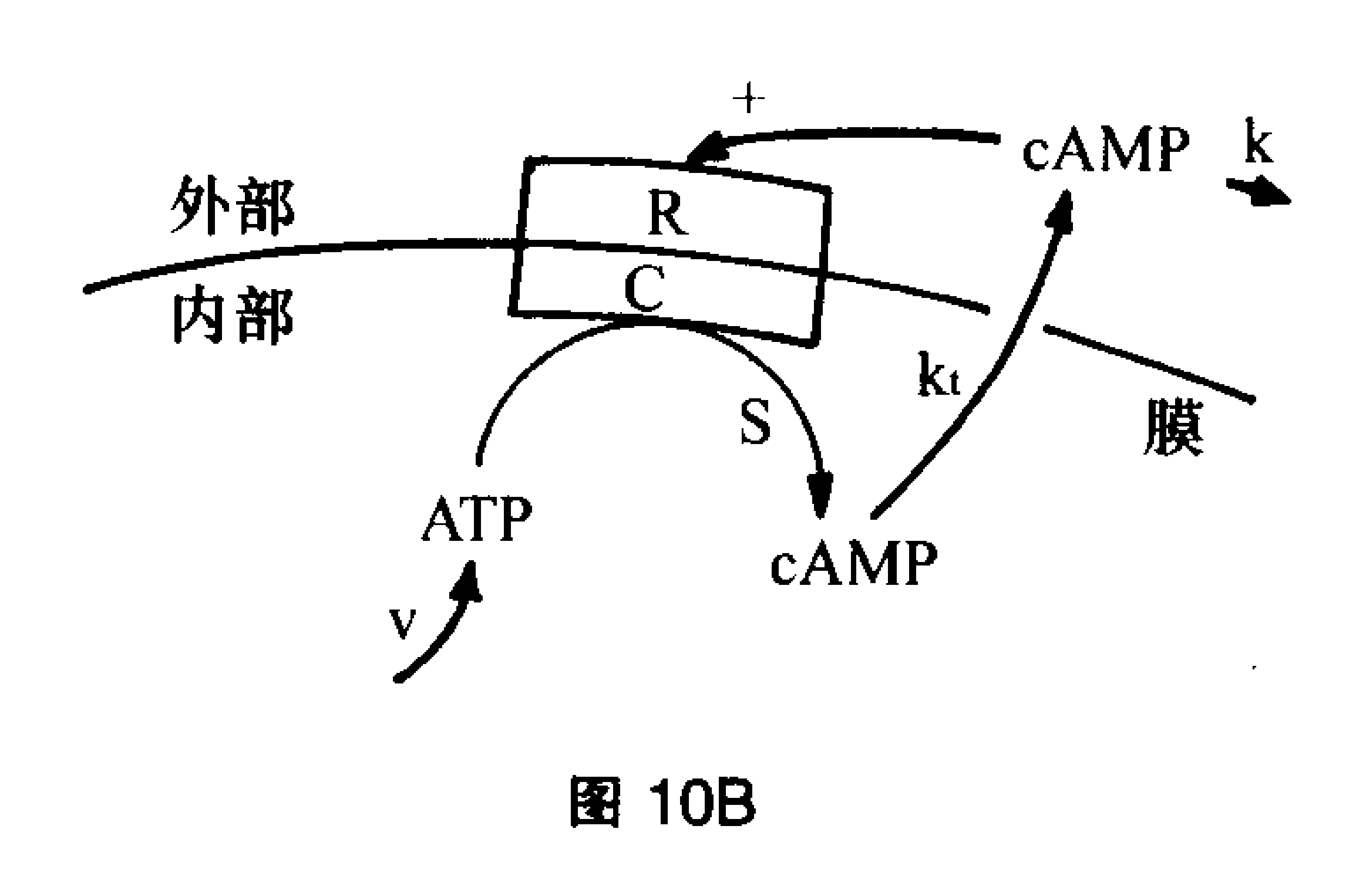


图 10B

在细胞表面，接收器(R)束缚 cAMP 分子。接收器面对细胞外的媒质，且在功能上联系着一个酶，即腺苷酸环化酶(C)，它使细胞内的 ATP 转变为 cAMP。如此合成的 cAMP 被传输，穿过膜而进入细胞外的媒质，在那里，它被磷酸二酯酶(阿米巴分泌出的一种酶)降解。实验表明，把细胞外 cAMP 束缚到膜接收器使腺苷酸环化酶激活(用 + 号表示正反馈)。

在这种自催化调节的基础上，对一种 cAMP 合成模型的分析使我们能把在聚集过程中观察到的不同类型的行为统一起来。

该模型的两个关键参量是腺苷酸环化酶的浓度(s)和磷酸二酯酶的浓度(k)。图10C(据 A. Goldbeter 和 L. Segel, *Differentiation*,第 17 卷(1980)，第 127—135 页重画)表明模型化系统在由 s 和 k 形成的空间中的行为。

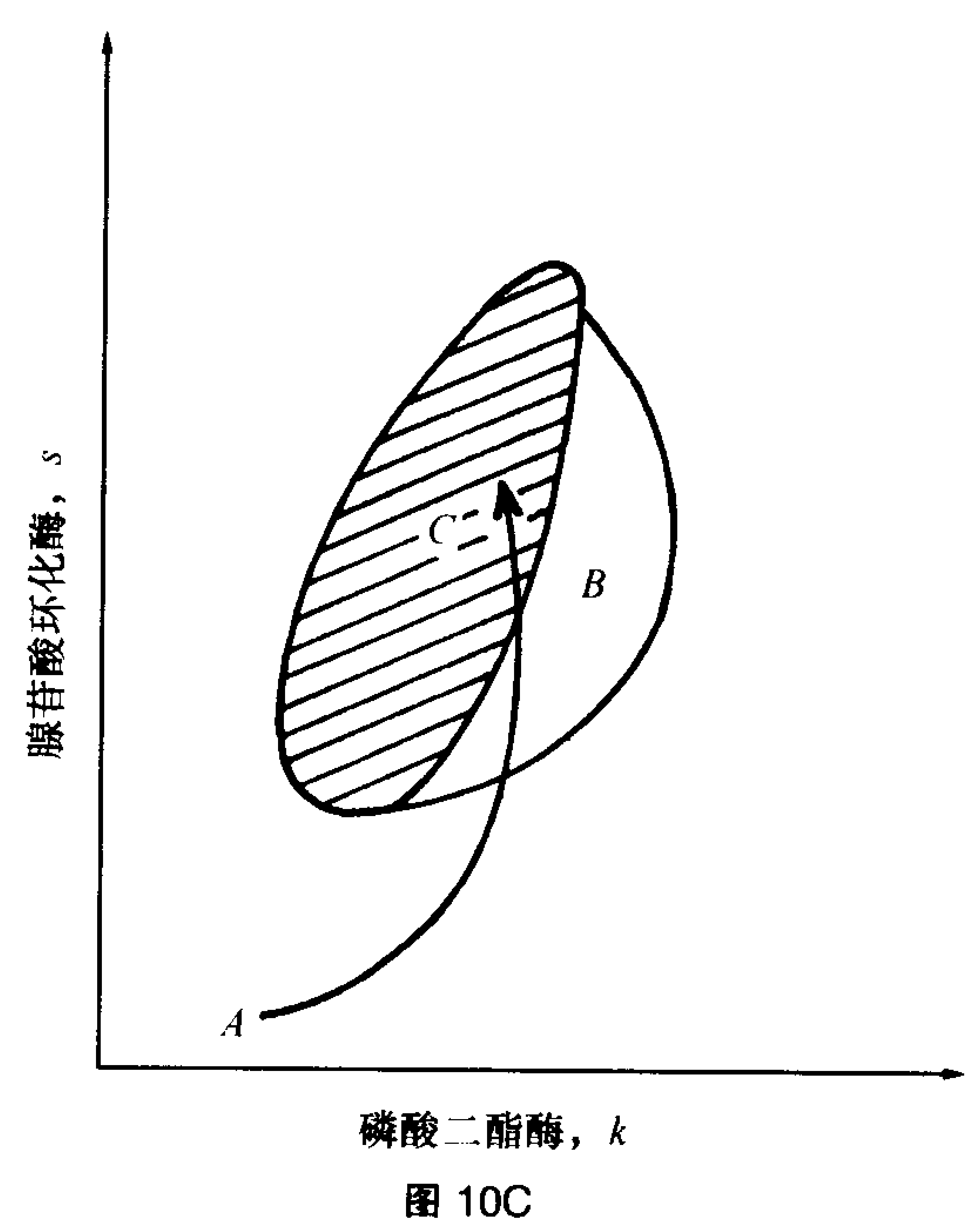


图 10C

对于不同的 k 值和 s 值，可以区分三个区域。区域 A 对应于一种稳定的、不可激发的定态；区域 B 对应于一种稳定但可激发的定态：系统

能够以脉动方式对 cAMP 浓度的小涨落进行放大(因而能够转发 cAMP 信号);区域 *C* 对应于在不稳定定态附近持续振荡的状态。

箭头表示一种可能的“发展路径”,相当于磷酸二酯酶(*k*)和腺苷酸环化酶(*s*)的增长,这种增长已被观察到在饥饿开始之后发生。箭头穿过区域 *A*、*B* 和 *C* 对应于观察到的行为变化:最初细胞不能对细胞外的 cAMP 信号作出响应;后来,它们转发了这些信号,最后,它们变得能够以自主的方式周期地合成它们。因此,聚集中心将是这样的一些细胞,对于这些细胞,参量 *s* 和 *k* 在饥饿开始后较快地达到位于区域 *C* 内的一个点。

对聚集过程第一阶段的研究揭示出,聚集是从发出阿米巴群体内的位移波开始的,是从阿米巴聚向某个像是自发产生的“吸引中心”的脉动运动开始的。实验研究和建立模型的工作已经表明,这种迁移是细胞对环境中存在着某关键物质(环状 AMP)的浓度梯度的响应。这关键物质是由作为吸引中心的阿米巴周期地产生出来的,后来则由其他细胞通过转发机制产生。这里,我们又一次看到化学钟的惊人作用。如我们已经强调的,它们提供了新的通信手段。在当前的例子中,自组织机制引起了细胞间的通信。

还有另一个方面,我们也想强调一下。粘菌聚集是一种可以称做“通过涨落达到有序”的过程的一个典型例子:释放 AMP 的吸引中心的建立表明,和正常营养环境相应的代谢秩序已经变成不稳定的——就是说,富于营养的环境已经变得消耗殆尽了。在这种食物短缺的条件下,任何给定的阿米巴都可能第一个出来发射环状 AMP 并因而成为一个吸引中心,这个事实相当于涨落的随机行为。然后,这个涨落被放大,并将媒质组织起来。

6 分叉和对称破缺

让我们仔细看一看自组织的出现以及当我们越过这一阈值时所发生的那些过程。在平衡态或近平衡态，只有一个稳恒态，它和某些控制参量的值有关。我们将称 λ 为 控制参量，例如，它可能是第 4 节中描述过的布鲁塞尔器中物质 B 的浓度。我们现在跟踪该系统在 B 值增大时的状态变化。用这样的方法，可使系统越来越远离平衡态。在某点，我们达到“热力学分支”稳定性的阈。然后，我们达到通常称为“分叉点”的地方(分叉点是这样的一些点，其作用被麦克斯韦在他论述决定论与自由选择的关系时强调过，见第二章第 3 节)。

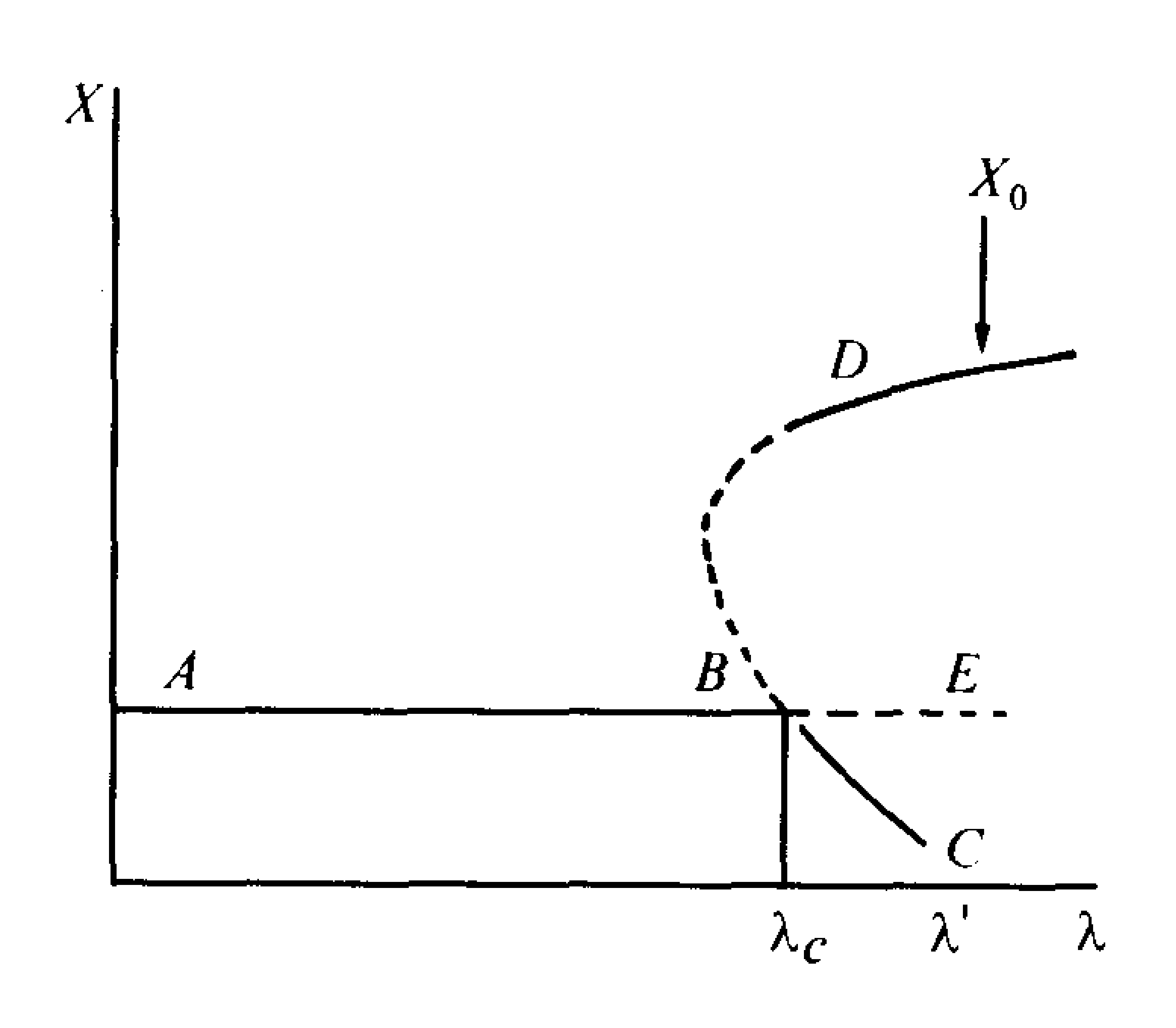


图 11 分叉示意图

图中画出稳恒态的 X 值，X 是分叉参量 λ 的函数。连续曲线代表稳定的定态；断续曲线代表不稳定的定态。达到分支 D 的惟一方法是从某浓度 X_0 开始，其值高于和分支 E 对应的 X 值。

让我们考虑几个典型的分叉图。在分叉点 B，热力学分支变得对涨落是不稳定的。对于控制参量 λ 的值 λc，系统可能处于三种不同的稳恒态：C, E, D。这三态中的两个是稳定的，一个是不稳定的。应当特别强调

指出，这种系统的行为与它们的历史有关。设我们慢慢地增大控制参量 λ 的值；我们很可能遵循图 11 中 A,B,C 这条路径。相反，如果我们从一个大的浓度值出发并保持控制参量的值不变，则我们很可能到达点 D。我们所达到的态与系统先前的历史有关。直到现在，历史通常被用于生物学现象和社会现象的解释，但说它在简单的化学过程中会起着重要作用，却是很出人意外的。

考虑图 12 所示的分叉图。它与前一图的区别在于，在分叉点处出现了两个新的稳定解。这样就提出一个新问题：当我们到达该分叉点时系统将走向何处?这里我们有一个在两种可能性之间的“选择”；它们可能代表化学品 X 在空间中的两种非均匀分布的这种或那种，如图 13 所示。这两种结构互为镜像。在图 13 的上图中，X 的浓度在右边较大；在下图中，左边较大。系统将如何选择左或右?这里有一个不可约化的随机因素；宏观方程无法预言系统将取的路径。转向微观描述也将无济于事，因为左右之间还是没有任何区别。我们面临的偶然事件十分类似于掷骰子。

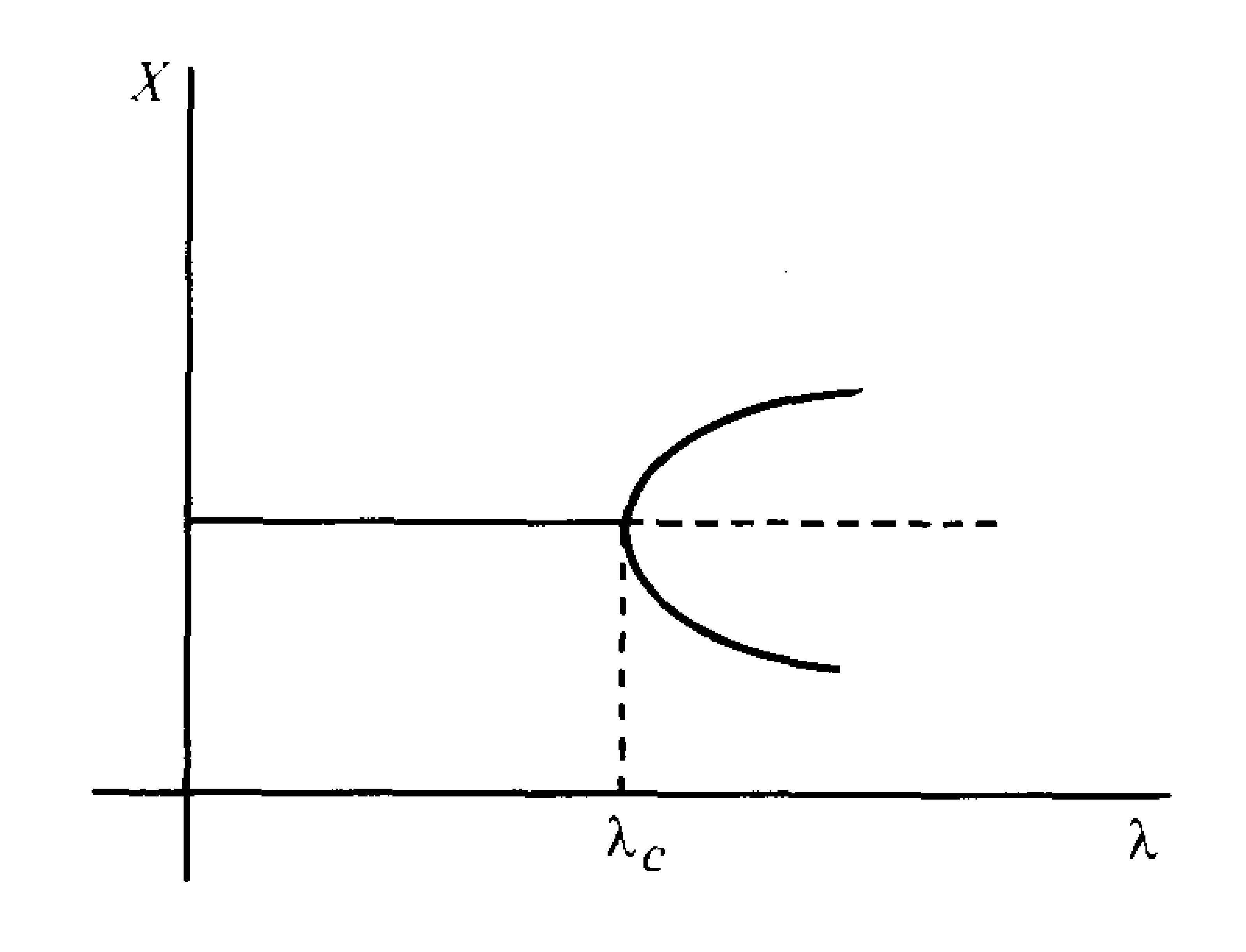


图 12　对称的分叉图

X 被画成是 λ 的一个函数。当 $\lambda < \lambda c$ 时，只有一个定态，是稳定的。当 $\lambda > \lambda c$ 时，对于每个 λ 值都有两个稳定的定态(原先稳定的态变成不稳的)。

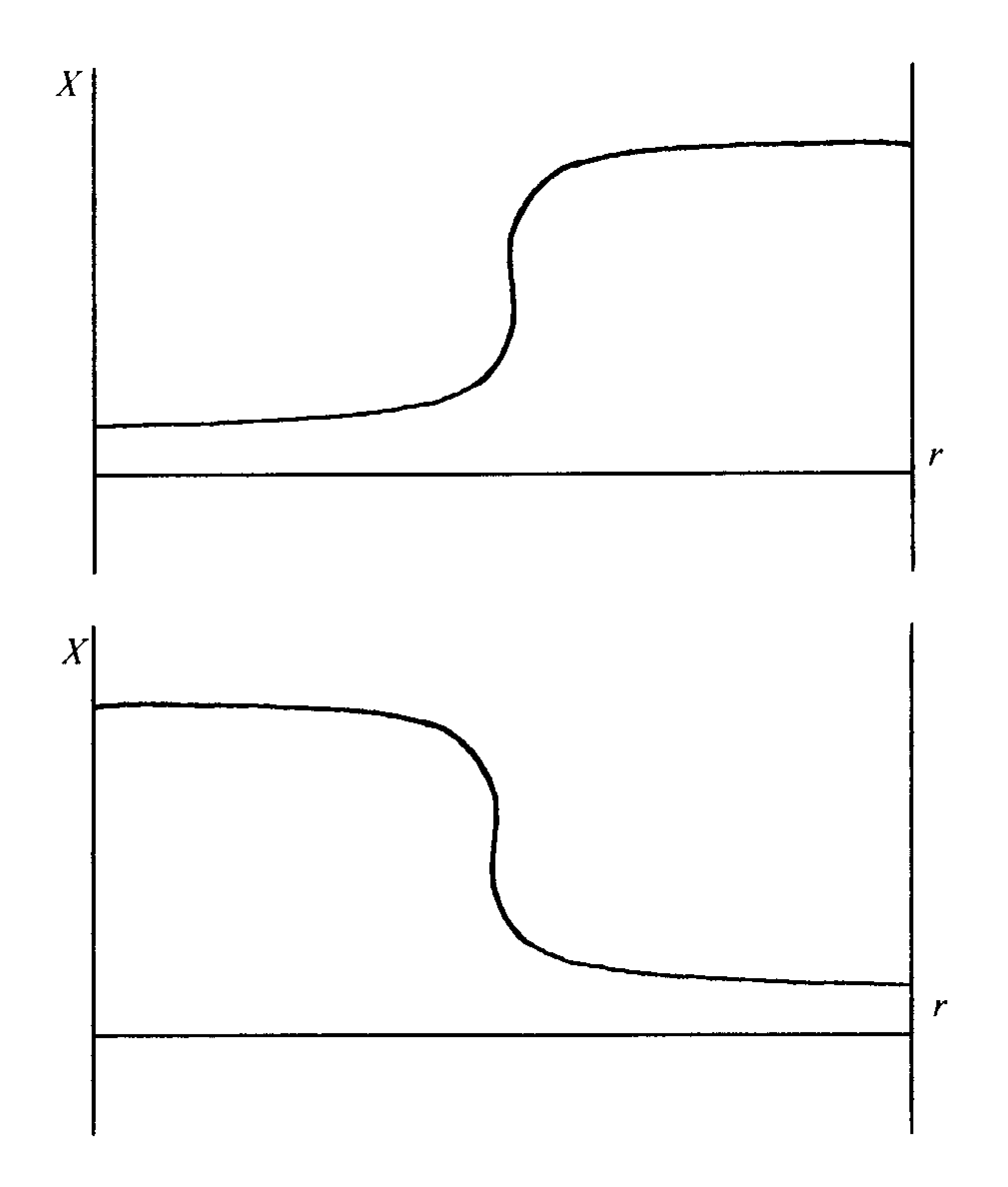


图 13 化学组分 X 的两种可能的空间分布

对应于图 12 中两个分支的每一支。上图对应于一种"右"结构，因为组分 X 在右半部具有较高的浓度；同样，下图对应于一种"左"结构。

我们可能指望，如果我们将此实验重复多次，且令系统越过分叉点，那么一半的系统将走进左组态，一半走进右组态。这里又发生一个有趣的问题：在我们周围的世界里，某些基本的简单对称性似乎被打破了。每个人都观察过，贝壳一般都有一个偏爱的螺旋性。巴斯德走得那么远，甚至在非对称性中，在对称的破缺中，看出了生命的真正特点。我们今天知道，最基本的核酸 DNA 采取了左旋的形式。这种非对称性是怎样产生的？一个普通的回答就是，它来自一个惟一的事件，该事件偶然地喜好两种可能的结果之一；然后，自催化过程开始了，左手结构产生出其他的左手结构。另一些人认为，在左手结构和右手结构之间有一

场“战争”,在这场战争中,一方歼灭了另一方。这些是我们尚未找到满意答案的问题。只说到惟一事件还不能令人满意,我们需要更加“系统的”解释。

我们最近发现了物质在远离平衡条件下获得的一些基本新属性的一个惊人的例子:外部的场,比如引力场,可以被系统“察觉”,从而创造出模式选择的可能性。

一个外部场(引力场)怎能改变平衡状况?答案是由玻耳兹曼的有序性原理给出的:所涉及的基本量是势能与热能的比。就地球引力场而言,这是一个小数量;我们必须爬上高山,才能得到大气压力或大气组成的明显变化。但是请回忆一下贝纳德格子;从力学的角度来看,其不稳定性的原因就在于热膨胀提高了它的重心。换句话说,引力在这里起了主要作用,并导致一种新的结构,尽管贝纳德格子可能只有几毫米的厚度。引力在如此薄层上的效果,当处于平衡态时,是可以忽略的。但是由于温度差所引起的非平衡态,引力的宏观效果甚至在这薄层中也变为可见的。非平衡态扩大了引力的效果。

引力显然将修正反应扩散方程中的扩散流。详细计算表明,在未扰动系统的分叉点附近,这种修正可能是十分显著的。特别是,我们可以得到这样的结论:非常小的引力场就能导致模式的选择。

让我们再次考虑一个具有如图12所示的分叉图的系统。设当没有引力,即 $g=0$ 时,我们有如图13中那样的不对称“上下”模式及其镜像“下上”模式。两者是同样可能的,但当 g 被考虑到时,分叉方程便受到修正,因为扩散流包含了与 g 成比例的一项。结果,我们现在得到如图14所示的分叉图。原始分叉消失了——无论该场的值是什么,这一点均成立。现在,一个结构(a)随着分叉参量的增长而连续地出现;与此同时,另一结构(b)却只能通过某个有限的扰动来得到。

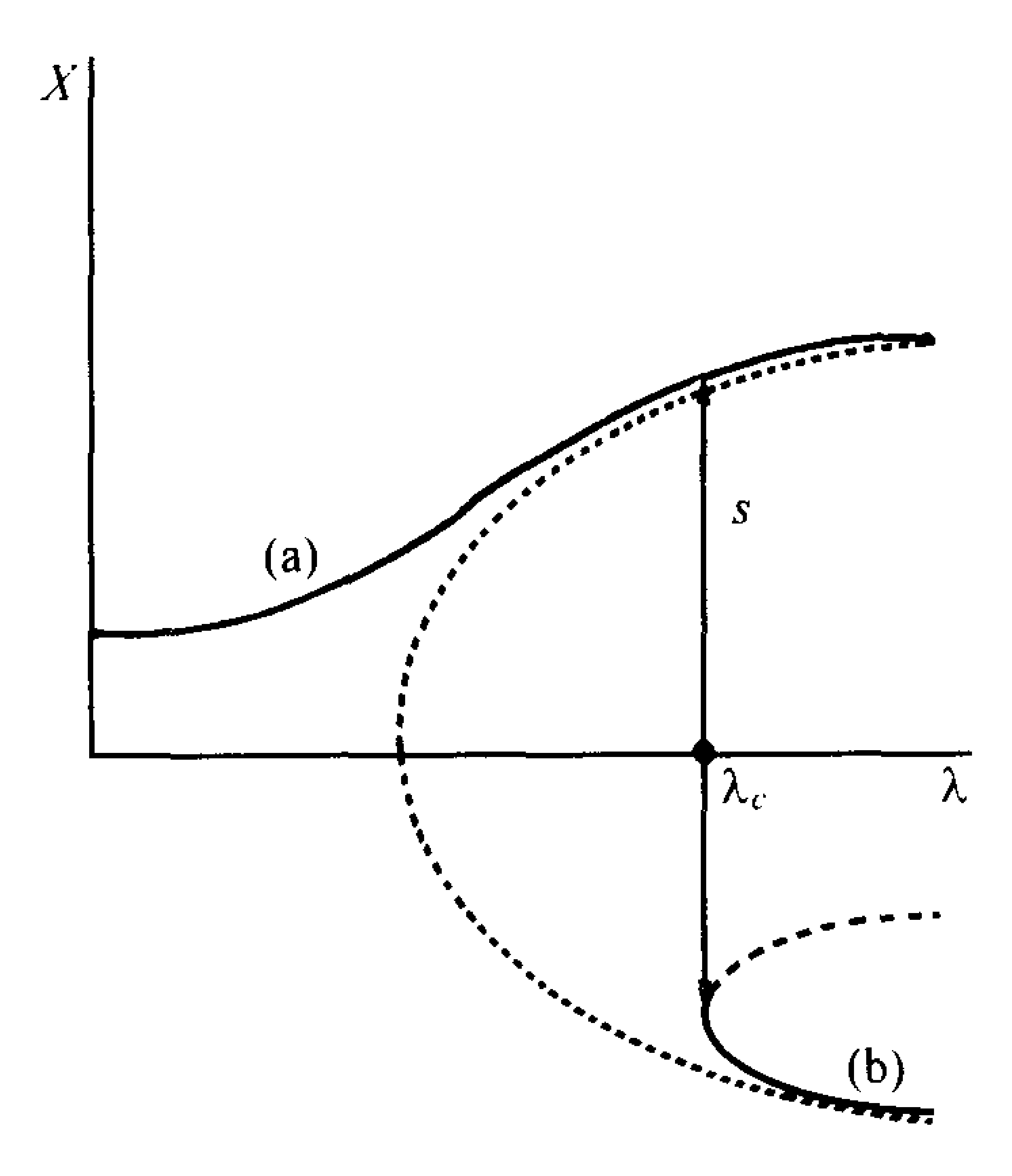


图 14 外部场存在时的辅助分叉现象

X 被画成参量 λ 的函数。点线代表没有外部场时发生的对称分叉。
分叉值为 λ c，稳定分支(b)与分支(a)相隔有限距离。

因此，如果我们跟踪路径(a)，我们可以期望该系统沿着这条连续的路径前进。这个期望是对的，只要这两个分支间的距离 s 相对于浓度 X 的热涨落来说保持足够大。这里所发生的就是我们所谓的"辅助"分叉。和以前一样，在 λc 值的附近可能发生一个自组织过程。但现在是两种可能的模式之一被偏爱并将被选中。

重要的是，这种机制(和形成分叉的化学过程有关)表现出非同寻常的灵敏度。如我们在本章早些时候提到过的，物质感觉得到在平衡态下微不足道的差别。这种可能性引导我们去思考一些最简单的有机体，如细菌，我们知道这些有机体能够对电场或磁场发生反应。更一般地说，它们表明，远离平衡态的化学引出了化学过程对于外部条件的可能的"适应力"。这一点和平衡态的情形形成了强烈对比，在平衡态的情形中，大的扰动或边界条件的改变对于确定从一种结构到另一种结构的转变是必需的。

远离平衡态对外部涨落的敏感是一个系统对它的环境的自发“适应组织”的另一个例子。让我们给出自组织作为起伏着的外部条件的函数的一个例子。最简单的可以想象出的化学反应是同分异构化反应，在那里有 $A \rightleftharpoons B$。在我们的模型中，产物 A 还可以进入另一反应：A + 光→A^*→A + 热。A 吸收光，且在离开其受激态 A^* 时放出热。考虑在封闭系统中发生的这两个过程：能和外界进行交换的只有光和热。系统中存在着非线性，这是因为从 B 转变为 A 时是吸热的：温度越高，A 的形成就越快。但 A 的浓度越高，A 所吸收的光也就越多，转变成的热也就越多，温度也就越高。A 催化着它自己的形成。

我们期望发现，和定态对应的 A 的浓度随着光强的增高而增高。事实确是如此。但是从某个临界点出发，出现了一个标准的远离平衡现象：多个定态共存。对于同样的光强和温度值，可发现系统处在 A 的浓度不同的两个不同的稳定定态中。第三个态是不稳定的，它标志着前两个态之间的阈值。这样的定态共存产生出人们熟知的滞后现象(参阅图15)。但这还不是事情的全部。如果光强不是常数，而是随机涨落的，则情况会发生深刻变化。两定态间的共存地带扩大，且在一定的参量值时，三个稳定定态的共存也变成是可能的。

在这样的场合，外部流中的一个随机涨落(通常叫做“噪声”)远远不是令人讨厌的东西，反而能产生新型行为，这些新型行为在决定论性流的情况下隐含着更复杂得多的反应模式。需记住，流中的随机噪声可被认为是任何“自然系统”中所不能避免的。例如，在生物学或生态学系统中，确定和环境进行相互作用的那些参量一般说来不能被看作是常量。无论是细胞，还是生态小生境，都从它们的环境中摄取营养；而湿度、pH 值、盐浓度、光和各种营养物组成一个不断波动着的环境。非平衡态不仅对它们的内部活动所产生的涨落敏感，而且对从它们的环境中来的

涨落敏感，这种敏感性为生物学研究提供了新的前景。

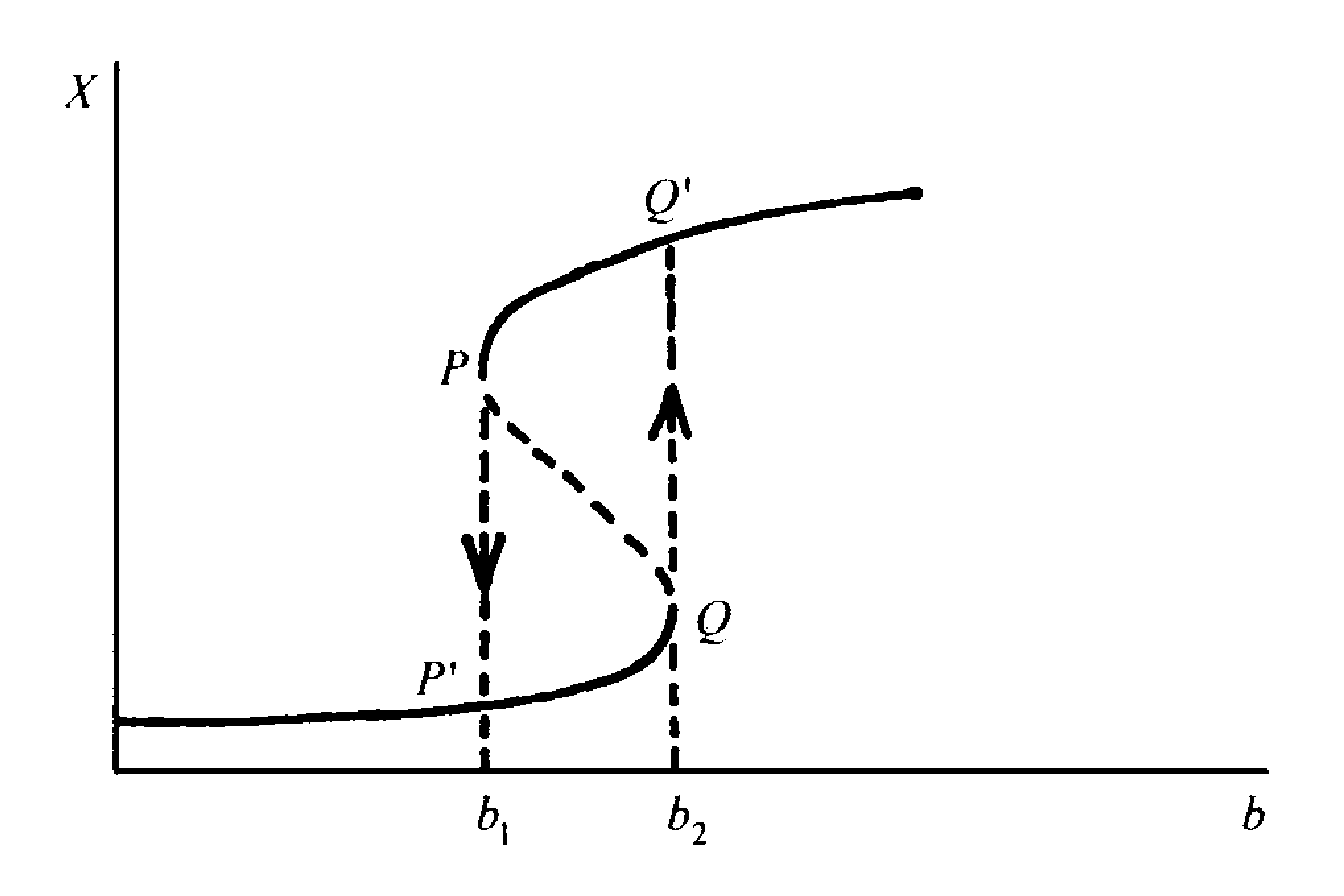


图 15 本图表示当我们使分叉参数 b 的值先是增大然后减小时，“滞后”现象是怎样发生的

如果系统起初是在属于较低分支的某一定态中，那么当 b 增大时它将停在那里。但是当 $b=b_2$ 时，将有一个不连续性发生：系统从 Q 跳到 Q'，即跳到较高的分支上。反过来，从较高分支上的某一态出发，系统将维持在那里，直到 $b=b_1$，这时系统将下跳至 P'。这种类型的双稳定行为已在许多领域被观察到，例如激光、化学反应或生物膜。

7 逐级分叉和向混沌的过渡

上节所讨论的只是第一个分叉，或如数学家所称的一级分叉，这种分叉在我们把系统推出稳定性阈外时发生。这个一级分叉远不是把可能出现的新解完全包括进去，它只是引入一个单一的特征时间(极限环的周期)或一个单一的特征长度。为了产生在化学或生物学系统中所观察到的复杂的空时活动，我们必须进一步跟踪分叉图。

我们已经提及在流体力学或化学系统中由于许多频率的复杂相互作用而产生的现象。让我们考虑贝纳德结构，它们出现在平衡态外的一个临界距离上。进一步远离热平衡态时，对流开始按时间振荡；随着与平衡态的距离的进一步增大，越来越多的振荡频率出现了，最后完成向非平衡态的过渡。这些频率间的相互作用产生出大涨落的

可能性；分叉图中由这样的参量值所确定的“区域”常被称为“混沌的”。在如贝纳德不稳定性的情形中，有序或相干被夹在热混沌和非平衡湍流混沌之间。事实上，如果我们继续增大温度梯度，对流花纹将变得更为复杂；振荡开始，且对流的有序方面大部分被破坏。但是，我们不应把“平衡热混沌”和“非平衡湍流混沌”混淆起来。在平衡态实现热混沌时，所有特征空间和特征时间的尺度都在分子的范围中；而在发生湍流混沌时，我们有如此丰富的宏观时间和长度的尺度，使系统呈现混沌。在化学中，有序和混沌间的关系是极为复杂的：在混沌行为方式的后面跟随而来的是有序(振荡)状态的连续方式。例如，在别罗索夫-扎鲍廷斯基反应中，这一点已被观察到，它是流速的一个函数。

在许多场合，很难分清像“有序”和“混沌”这类字眼的含义。一个热带森林究竟是有序的还是混沌的系统呢？任何特殊动物物种的历史都是非常偶然的，这和其他物种有关，也和环境的偶然变化有关。尽管如此，我们的感觉还是坚持：由(比如说)物种多样性所代表的某一热带森林的总模式，是和有序的真正原型相对应的。无论我们最终将赋予这个术语的精确含义是什么，很清楚，在某些场合，分叉的连续构成一个不可逆的演化过程，在那里，特征频率的决定论产生出一个由这些频率的多重性所导致的不断增加着的随机状态。

已经引起广泛注意的通向“混沌”的非常简单的道路就是“费根鲍姆序列”。它涉及任何这样的系统，其行为具有十分一般的特点，这就是：对于参量值的某一确定范围，系统的行为是周期性的，周期为 T；超出这一范围时，周期变为 $2T$，当超出另一临界阈值时，系统需以 $4T$ 为其周期。因此，系统以某种逐级分叉为特点，每一相继的周期为前一周期的两倍。这就组成了一个典型的通路，从简单的周期行为走向复杂的

非周期行为，非周期的行为是当周期无限地加倍时发生的。费根鲍姆发现的这个通路的特点是，只要该系统具备周期加倍这个性质，通路就具有普适的数字特点，不论所涉及的机制是什么，“事实上，任何这样的系统在这个非周期极限之内的大多数可测量的性质，现在都可用基本上绕过支配着具体系统的方程的细节的方法来确定……”

在其他场合，比如图16所示，决定论的和随机的两种因素同时确定着系统的历史特点。

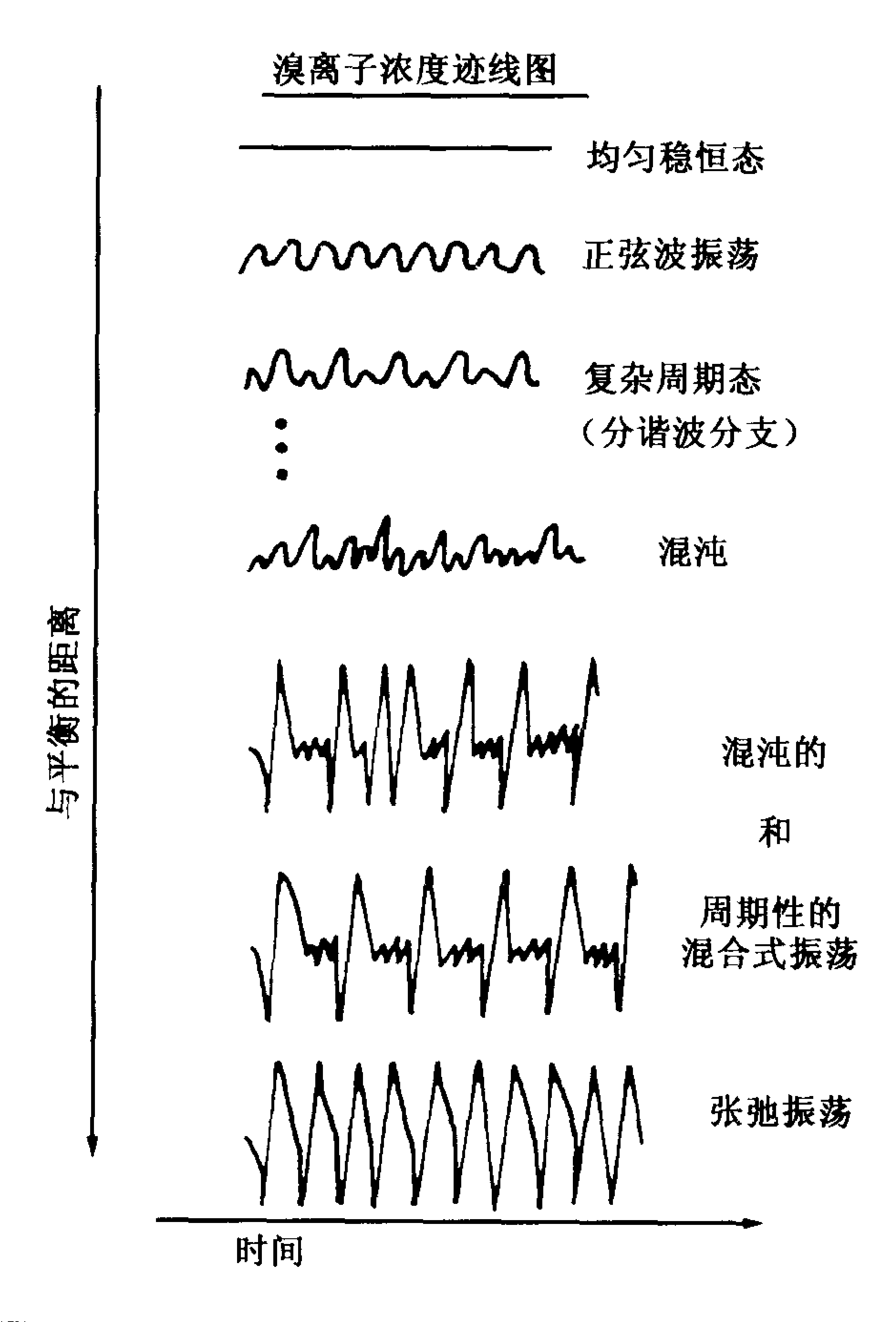


图16 别罗索夫－扎鲍廷斯基反应中 Br^- 离子的时间振荡

图中示出一系列对应于各性质差别的区域。这里只是示意。实验数据指出更复杂得多的序列的存在。

如果我们考虑图 17，且令控制参量具有一个数量级为 λ_6 的值，我们就会看到，该系统已经含有很多可能会有的稳定的和不稳定的行为。当控制参量增大时，系统将沿着“历史”路径演变，这路径的特征是有一系列相继的稳定区域(这些区域由决定论的法则支配着)和不稳定区域(它们靠近分叉点，在那里系统可以在多于一种可能的未来之间作出“选择”)。动力学方程的决定论特点(由这些可以计算出一组可能的态和各自的稳定性)和随机涨落(它们在分叉点附近的各态之间进行“选择”)难解难分地连接在一起。这个必然性和偶然性的混合组成了该系统的历史。

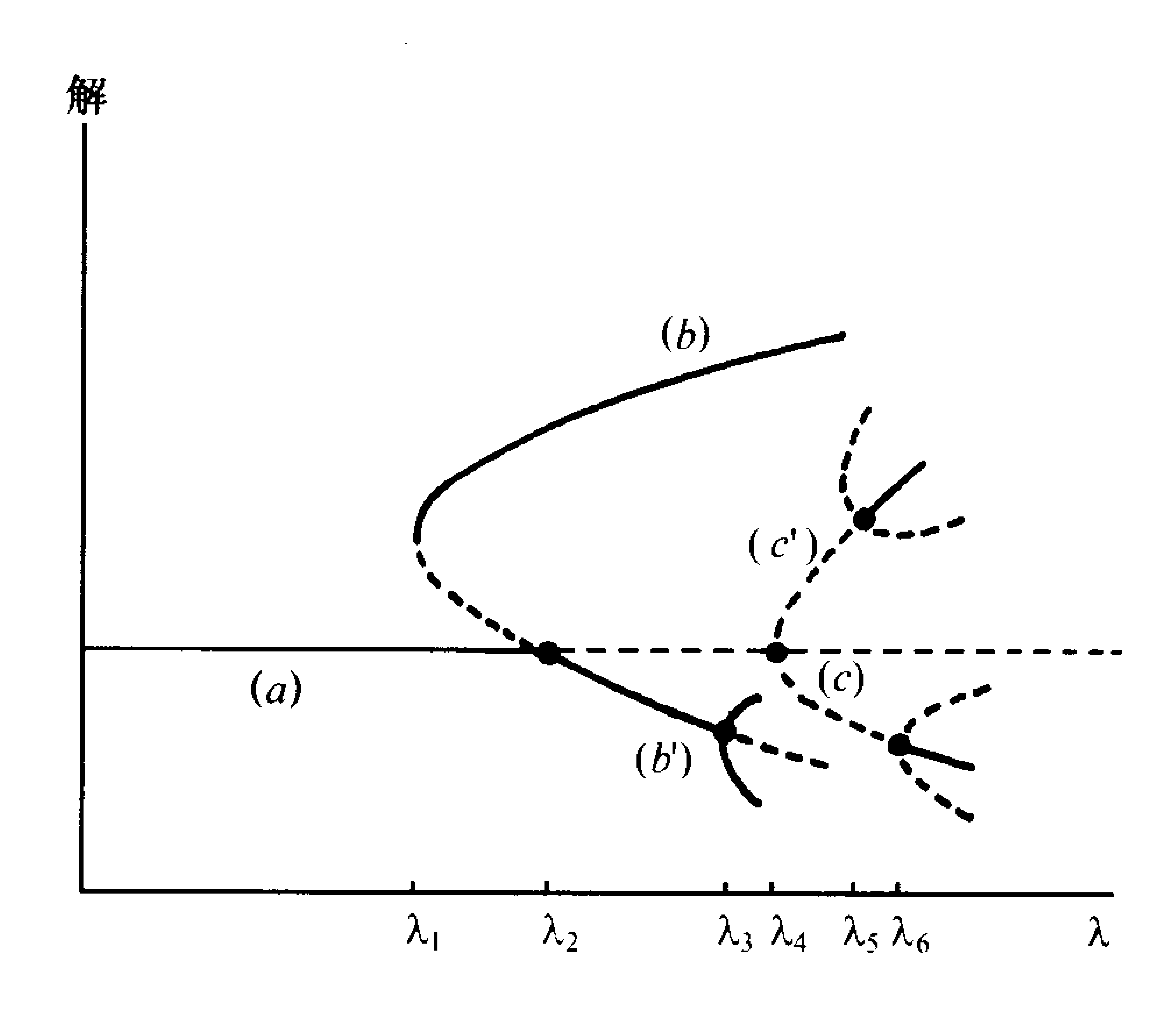


图 17　分叉图

图中画出定态解与分叉参量 λ 的关系。当 $\lambda < \lambda_1$ 时，每个 λ 值只有一个定态；这组定态构成分支 a。当 $\lambda = \lambda_1$ 时，另两组定态成为可能的(分支 b 和 b')。

b' 的态是不稳定的，但在 $\lambda = \lambda_2$ 时变为稳定的。与此同时，分支 a 的态度为不稳定的。当 $\lambda = \lambda_3$ 时，分支 b' 又成为不稳定的，同时另外两个稳定分支出现了。

当 $\lambda = \lambda_4$ 时，不稳定分支 a 达到一个新的分叉点，在那里两个新的分支成为可能的，它们在达到 $\lambda = \lambda_5$ 和 $\lambda = \lambda_6$ 之前一直是不稳定的。

8 从欧几里得到亚里士多德

耗散结构的最令人感兴趣的方面之一就是它们的相干性。系统的行为是整体性的，就像系统是一些长程力的作用场所。不管在事实上分子间的相互作用不会超过约 10^{-8} 厘米的范围，该系统却是构成得好像每个分子都得到了有关系统总状态的“信息”似的。

人们常说(我们已经反复说过)，近代科学是在亚里士多德空间(对这空间来说，生物机能的组织性和一致性曾是鼓舞人心的一个根源)被均匀而各向同性的欧几里得空间代替时诞生的。但是，耗散结构理论使我们更加接近亚里士多德的概念。无论我们是在讨论化学钟，浓度波，还是化学产物的非均匀分布，不稳定性都起着打破时间上和空间上这两个对称性的作用。在极限环中，任何两个瞬间都不等效；化学反应得出一种相，类似于比如说具有光波特点的相。而且，当从某种不稳定性中得出了一个被偏爱的方向时，空间将不再是各向同性的。我们从欧几里得空间移到了亚里士多德空间!

诱人去推测的是，空间和时间的对称破缺在形态发生的迷人现象中可能起着重要的作用。这些现象常使人们相信，这里一定包含着某种内部目标，即胚胎在完成发育时所实现的某个计划。在本世纪初，德国胚胎学家汉斯·杜里舒*相信，胚胎发育的原因是某种无形的“生命原理”(entelechy)在起作用。他发现，胚胎在其早期阶段能够抵制最剧烈的扰动，并且能够不顾这些扰动而发育成一个正常的、功能健全的有机体。另一方面，当我们在影片上观察胚胎发育时，我们“看到”了一些跳跃，它们对应于剧烈的重新组织的过程，在这些跳跃之后是比较“平和”

---

* 杜里舒(Hans Driesch，1867—1941)，德国哲学家，生物学家，新活力论者。——译者

的数量增长的时期。幸亏这里没有什么错误。这些跳跃是以一种可以再现的方式进行的。我们可能推测出，进化的基本机制基于作为探索机制的分叉间的作用和使某一特定轨道稳定化的化学相互作用的选择。大约四十年前，生物学家瓦丁顿(Waddington)引入了这样一种思想。他用来描述发展的稳定路径的"克罗德"(chreod)的概念*，相当于由灵活性和安全性的双重要求所产生的可能的发展路线。显然，这个问题很复杂，在此只能作一简短的讨论。

很多年前，胚胎学家们引入了形态发生场的概念，并提出这样的假设：细胞的分化与它在这种场中的位置有关。但一个细胞是怎样"识别"它的位置的呢?常常引起争论的一种思想是某种特征物质的"梯度"的思想，即一种或多种"形态基因"的思想。这种梯度可能实际上是由在远离平衡条件下的对称破缺不稳定性所产生的。某个化学梯度一旦被产生出来，它就会向每个细胞提供一个不同的化学环境，并因而引导它们中的每一个去合成一组特殊的蛋白质。这个现在被广泛利用的模型似乎与实验证据是吻合的。特别是，我们可以参考考夫曼关于果蝇的著作。一个反应扩散系统被认为与那些看来在早期胚胎的不同细胞群中发生的各种可供选择的发展计划的采用有关。每个间隔都用二元选择的一个惟一的组合来说明，每一个这种选择都是某一个空间对称破缺分叉的结果。该模型使我们成功地预言了移植的结果，这种移植是初始区域和最终区域间"距离"的函数，也就是说，它是二元选择的状态或说明每一状态的"开关"间的差数的函数(参阅图18)。

---

* "克罗德"的概念是瓦丁顿二十多年前提出的，对胚胎发育作定性描述的一部分。它实际是一种分叉的进化：循着顺序的研究，胚胎在一种"渐成论的背景"中发展，那里可能同时存在着稳定的部分和在几种发育途径中选择一种的部分。参阅C.H.Waddington, *The Strategy of the Genes*(1957)。

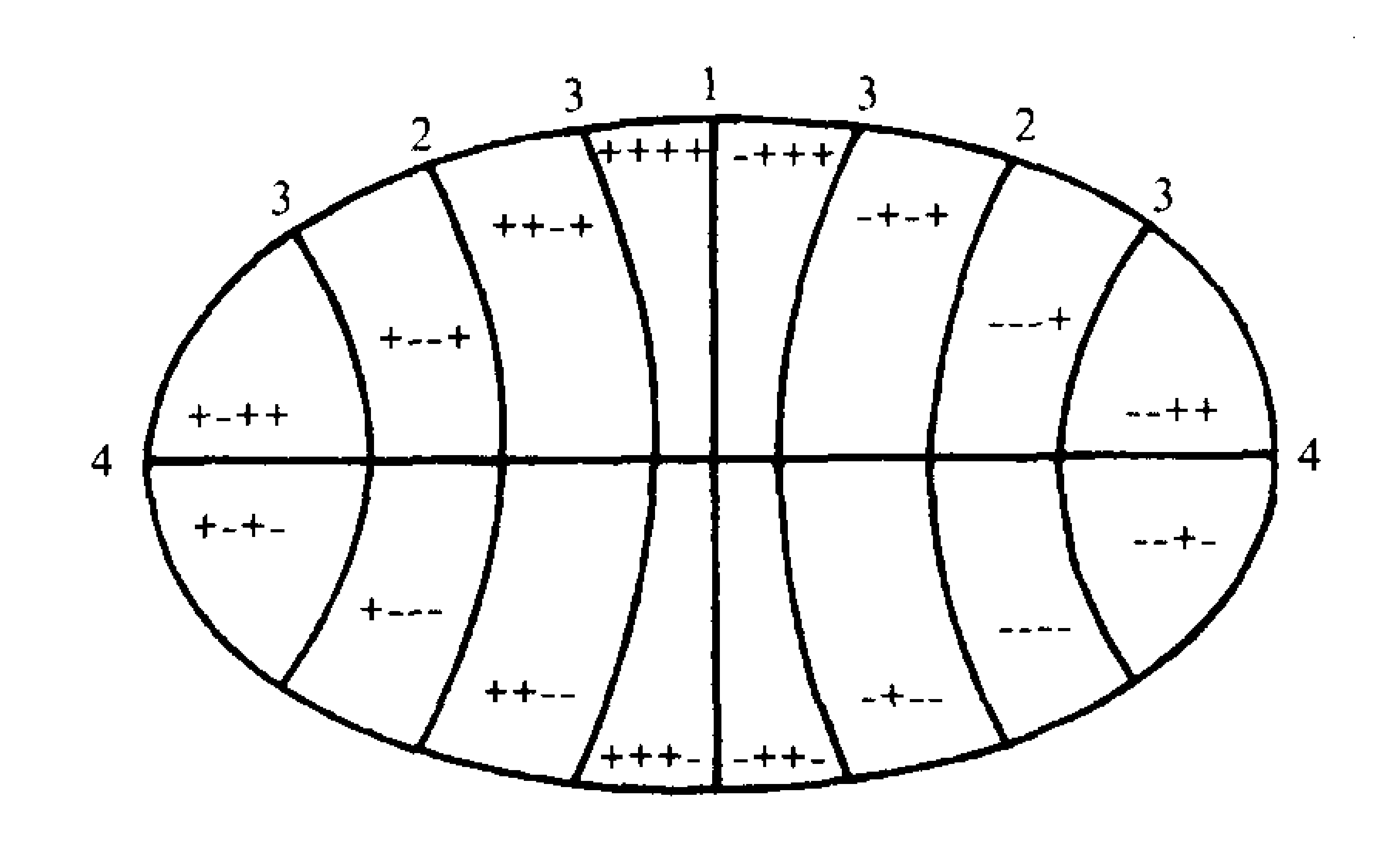


图 18　从逐级的二元选择得出的果蝇胚胎结构的示意图

详见正文。

这样的思想和模型在生物学系统中特别重要，在这类系统中，胚胎开始在一个表面上是对称的态中发育(例如，黑角藻属伞藻)。我们可能要问，胚胎在开始时是否真是均匀的。而且即使在初始环境中存在着小的不均匀性，它们是否引起或引导演化朝着某一给定的结构发展?现在尚无对这类问题的精确回答。但是，一件事情看来已经确定：与化学反应和输运有关的不稳定性似乎是能够打破初始均匀状态的对称性的惟一的普遍机制。

这种解的真正可能性使我们远远超出了在约化论者和反约化论者之间的古老冲突。自从亚里士多德以来(我们还引用过施塔尔、黑格尔、柏格森和其他反约化论者的话)，同样的信念一直被表达出来：需要一个复杂组织的概念来连接各种层次的描述，并说明整体和部分行为间的关系。为了回答约化论者(在他们看来，单独的“原因”或组织只能存在于部分之中)，亚里士多德用了他的形式因，黑格尔用了他的自然精神的出现，柏格森用了他的简单的不可抑制的组织创造活动，来断言整体是主要的。让我们引用柏格森的话：

一般说来，当同一个对象一方面简单而另一方面却无限

复杂时，这两个方面绝不会是同样重要的，或者更确切地说没有同样程度的现实性。在这样的场合，简单性属于该对象本身，无限复杂性则属于我们在绕着它转时所采取的观点，属于那些我们的感觉和智能借以把它向我们说明的符号，或者更一般地，属于某个不同级别的要素，有了这些要素，我们试图用人工的方法去模仿它，但有了这些要素，它作为具有不同性质的东西，依然是不可通约的。一位天才的艺术家在他的画布上画出了一幅图画。我们可以用镶嵌多色小方块的方法来模仿他的画。当我们的方块越来越小，越来越多，色调变化越来越大时，我们可以把这模型的线条和明暗再现得越来越好。但是为了得到这幅画的精确的等效物，就必须使用无穷多个提供无穷多的明暗色调的无穷小的元素。而这位艺术家在作画时却把它想象成一件简单的东西，他要把这简单的东西作为一个整体搬到他的画布上，而且它越是作为不可分的直觉的映射来打动我们，它就越是完美。

在生物学中，约化论者和反约化论者间的冲突常常表现为肯定外部目标和肯定内部目标之间的对立。因此，内在有机智能的思想常常受到一种有机模型的反对，这种模型是从流行的技术(机械装置，热机，自动控制机器)那里借来的。这种模型立即引来了反驳：是“谁”建成了这个机器，这个遵守外部目标的自动机?

正如柏格森在本世纪初所强调的，无论技术模型，还是内部有机能力的活力论思想，都是不直接借助于某个已存在的目标就无法想象进行组织的一种无能的表现。今天，尽管分子生物学获得了惊人的成功，这个概念上的状况却依然如故：柏格森的论据可以用在当今的一些隐

喻上，如“组织者”，“调节者”和“遗传程序”。非正统的生物学家如保尔·韦斯(Paul Weiss)和康拉德·瓦丁顿正确地批评了把产生全局秩序生物学的能力归于个别分子的这种评断方式，因为它的目的是为了理解问题，然而这样做时，却把对问题的表述错当作问题的解了。必须承认，在生物学中进行的技术上的类比并非没有益处。但是，这种类比的一般有效性的意义在于：例如和在电子电路中一样，在对分子相互作用的描述和对全局行为的描述之间，有着基本的一致性：一个电路的功能可以从其继电器的性质和位置推演出来；两者属于同一尺度，因为继电器是由建成整个机器的同一位工程师设计和安装的。但在生物学中，这一点不能作为通例。

正确的是，当我们遇到一个生物系统，例如细菌的趋化时，很难不讲到一个由接收器、传感器、调节器和运动响应所组成的分子机器。我们知道大约有二三十种接收器，它们能检验出极特殊类型的化合物，且能使细菌逆着吸引物的空间梯度或顺着排斥物的梯度游动。这个“行为”是由处理系统的输出所决定的，就是说，由一个倒向器的开和关来改变细菌的方向。

虽然这些情况很吸引人，但它们并未讲出问题的全部。事实上诱使人们把它们看作是极限情形，是某特殊类型的选择进化的最终产物，以此强调以开放性和适应性为背景的稳定性和可再生行为。从这个角度出发，技术隐喻的关联不是主要的，而是机遇性的事情。

生物学的有序性问题包含从分子活动到细胞的超分子秩序的过渡。这个问题远未解决。

生物学的秩序常常被简单地作为不可几的物理状态而提出，这物理状态是被一些和麦克斯韦妖相像的酶建立并保持的，像小妖维持温度差和压力差一样，酶维持着系统中的化学差别。如果我们接受这一

点，生物学就会处于斯达尔所描述过的位置上。自然法则所容许的只是死亡。斯达尔关于灵魂的组织作用的想法，被包含在核酸中并在生命得以永远存在下去的酶的形成中表达出来的遗传信息所取代。酶延缓了死亡和生命的消失。

在不可逆过程物理学的范围内，生物学的成果显然具有不同的意义和不同的隐含。今天我们知道，无论是整个生物圈，还是它的组成部分(活的或死的)，都存在于远离平衡条件下。在这个意义上说，生命远不是在自然秩序之外，而是所发生的自组织过程的最高表现。

我们被引诱得走到如此之远，以至说，只要自组织的条件得到满足，生命就成为是可预言的，就像我们能预言贝纳德不稳定性或预言一块下落的石头一样。一个惊人的事实是，最近发现的化石形式的生命几乎是和第一次岩石形成同时出现的(今天所知道的最古老的微化石的年代为 $3.8 \cdot 10^9$ 年，而地球的年龄被推测为 $4.6 \cdot 10^9$ 年；第一批岩石的形成也是在 $3.8 \cdot 10^9$ 年前)。生命出现得这么早，无疑是一个有利的论据，说明只要条件允许，就会发生自发的自组织，而生命就是自发的自组织的结果。但是，我们必须承认，我们离开任何一种定量的理论都还很遥远。

回到我们对生命和进化的理解上来，我们现在处在较好的位置上，可以避免任何约化论谴责的危险。远离平衡态的系统可被描述成是有组织的，并非因为它实现了一个和基本活动不同或超越它们的计划，而相反是因为某个微观的涨落在“恰当时刻”被放大的结果使得一种反应路径优于其他许多同样可能的路径。因此，在一定的环境中，个别行为所起的作用可以是决定性的。更一般地说，“总”行为一般不能被认为以任何方式支配着组成整体的各基本过程。远离平衡条件下的自组织过程相当于偶然性和必然性之间、涨落和决定论法则之间的一个微妙的

相互作用。我们期望,在某个分叉附近,涨落或随机因素将起着重要作用,而在分叉与分叉之间,决定论的方面将处于支配地位。这些就是我们现在需要加以详细研究的问题。

第六章　通过涨落达到有序

1　涨落和化学

我们在导言中曾指出，当今正发生着对物理科学的重新概念化。物理科学正在从决定论的可逆过程走向随机的和不可逆的过程。这种观点上的变化对化学的影响尤为显著。如我们在第五章中已看到的，化学过程不同于经典动力学中的轨道，它们相当于不可逆过程。化学反应导致熵产生。另一方面，经典化学继续依赖于化学变化的决定论描述。我们在第五章中已看到，必须得出涉及不同化学组分的浓度的微分方程。一旦我们知道了在某初始时刻的这些浓度(如果涉及如扩散那样的与空间有关的现象，则还要知道在适当的边界条件下的这些浓度)，我们便能计算出下一时刻的浓度如何。令人感兴趣的是，当涉及远离平衡态的过程时，化学的决定论的观点便行不通了。

我们已经反复强调涨落的作用。这里我们概括一下某些较突出的特点。每当我们达到一个分叉点，决定论的描述便破坏了。系统中存在

的涨落的类型影响着对于将遵循的分支的选择。跨越分叉是个随机过程，例如掷钱币。化学混沌给出了另一例子(见第五章)。这里我们不再能遵循某一条单独的化学轨道。我们无法预言随时间而演变的详情。我们又一次看到，只有统计的描述才是可行的。某种不稳定性的存在可被看作是某个涨落的结果，这涨落起初局限在系统的一小部分内，随后扩展开来，并引出一个新的宏观态。

这种情形改变了对微观层次(用分子或原子来描述的层次)和宏观层次(用浓度这样一些全局变量来描述的层次)之间关系的传统观点。在许多情形中，涨落只相当于小的校正。作为一个例子，让我们取体积为 V 的容器中的由 N 个分子组成的气体。我们把这个体积划分为两个相等的部分。其中一个部分内的粒子数 X 是多少?这里变量 X 是一个“随机”变量，我们可以期望其值在 $N/2$ 左右。

概率论中的一个基本定理，即大数定律，给出对由涨落造成的“误差”的一个估计。实际上，大数定律指出，如果我们测量 X，我们必须期望数量级为 $N/2\pm\sqrt{N/2}$ 的值。假如 N 是个很大的数，则由涨落 $\sqrt{N/2}$ 所引入的差值可能也很大(若 $N=10^{24}$，则 $\sqrt{N}=10^{12}$)；但是由涨落所引起的相对误差具有$(\sqrt{N/2})/(N/2)$或 $1/\sqrt{N}$ 的数量级，因而对于足够大的 N 值，它趋近于零。只要系统变得足够大，我们根据大数定律便可在均值和涨落之间作出清晰的区分，而可以把涨落略去。

但是在非平衡过程中，我们可能发现刚好相反的情形，涨落决定全局的结果。我们可以说，涨落在此时并不是平均值中的校正值，而是改变了这些均值。这是一种新的情形。由于这个原因，我们愿意引入一个新词，把由涨落得出的情形称为“通过涨落达到有序”。在给出一些例子之前，让我们作出某些一般解释，以便说明这种情形的概念上的新奇性。

读者可能熟悉海森堡测不准关系，它以引人注目的方式表达出量

子论的概率特点。由于我们在量子论中不再能同时测量位置和坐标,因而经典的决定论被打破了。人们曾相信这一点对于描述如生命系统那样的宏观客体来说并不重要。但涨落在非平衡系统中的作用表明事情并非如此。在宏观层次上随机性仍然是主要的。值得注意的是和量子论(它赋予所有的基本粒子以波的性质) 的另一个类比。如我们已经看到的,远离平衡态的化学系统可能也引出相干的波的状态:这就是第五章中讨论过的化学钟。我们再次看到,量子力学在微观层次上所发现的某些性质现在在宏观层次上又出现了。

化学已被真正地卷入科学的重新概念化之中。我们也许还只是在新研究方向的起点上。如近来一些计算所启示的那样,反应速率的概念很可能在某些场合不得不被包含反应概率分布的统计理论所代替。

2 涨落和关联

让我们回到第五章讨论过的化学反应的类型上来。为了找出一个特例,我们考虑 $A \rightleftharpoons X \rightleftharpoons F$ 这样一个反应链。第五章中的动力方程是对平均浓度而言的。为了强调这一点,现在我们写作 $\langle X \rangle$ 来代替 X。于是我们可以问,在给定时刻为该组分的浓度找到数 X 的概率是什么。显然这个概率将是有涨落的,就像所涉及的不同分子间的碰撞数一样。很容易写出一个方程来描述由于产生分子 X 和消灭分子 X 的过程而得出的这一概率分布 $P(X,t)$的变化。我们可以对平衡系统或稳恒态系统进行计算。让我们先提一下对平衡系统得出的结果。

在平衡态,我们实际上是恢复了一种经典的概率分布,即泊松分布*

* 法国数学家泊松(Poisson, 1781—1840)建立的随机概率分布。——译者

(每一本有关概率的教科书中都有对泊松分布的描述),因为它在很多不同情形中都是成立的,例如电话呼叫的分布,饭馆中的等待时间,或在某气体或液体中粒子浓度的涨落。此处,该分布的数学形式是无关紧要的。我们只想强调它的两个方面。首先,它导出本章第 1 节中表述的大数定律。由此,在大系统中涨落确实成为可以忽略的。而且这一定律使我们能够计算在相距 r 的空间两不同点处粒子数 X 之间的关联。计算表明,在平衡态不存在这样的关联。在两个不同点 r 和 r' 处找到两个分子 X 和 X' 的概率等于在 r 找到 X 和在 r' 找到 X' 的概率之积(我们假定 r 与 r' 间的距离大于分子间力的作用范围)。

在最近的研究中最没有料到的结果之一是,当我们走向非平衡态时,这种情形发生了剧烈的变化。首先,当我们接近分叉点时,涨落变得异常地大,且大数定律被违反了。这一点是意料中的,因为此时系统可能在不同的状态之间作出“选择”。涨落甚至可能达到和平均宏观值同样的数量级。于是涨落与均值之间的区分被打破了。此外,在第五章讨论过的非线性的化学反应中,长程关联出现了。相隔宏观距离的粒子变成连接的。局域的事件在整个系统中得到反响。值得注意的是,这种长程关联精确地发生在从平衡态到非平衡态的过渡点上。从这种观点看,这种过渡好像是一种相过渡。不过,这些长程关联的幅度起初较小,但随着与平衡态的距离而增大,并可能在分叉点处变为无穷大。

我们相信,这种类型的行为是非常令人感兴趣的,因为它为我们在讨论化学钟时提到的通信问题提供了一个分子的基础。甚至在宏观分叉点之前,系统也能通过这些长程关联而组织起来。我们回到本书的主要思想之一:非平衡是有序的源泉。在此处这种情形是特别清楚的。在平衡态,分子作为基本上是独立的实体而动作;它们互不理睬。我们愿意把它们称作是“睡子”或“梦游者”。虽然它们当中的每一个都可能像

我们所希望的那样复杂,但它们互不干涉。但是非平衡却把它们唤醒,且引入了一种和平衡态大不相同的相干性。我们将在第九章展开讨论的关于不可逆过程的微观理论将提供一幅类似的物质图景。

物质的活性和它本身可能产生的非平衡条件有关。正如宏观状态一样,涨落和关联的规律在平衡态(此时我们得到泊松型的分布)是普适的;当我们越过平衡态与非平衡态间的边界时,它们随着所含非线性的类型而变得高度特殊。

3 涨落的放大

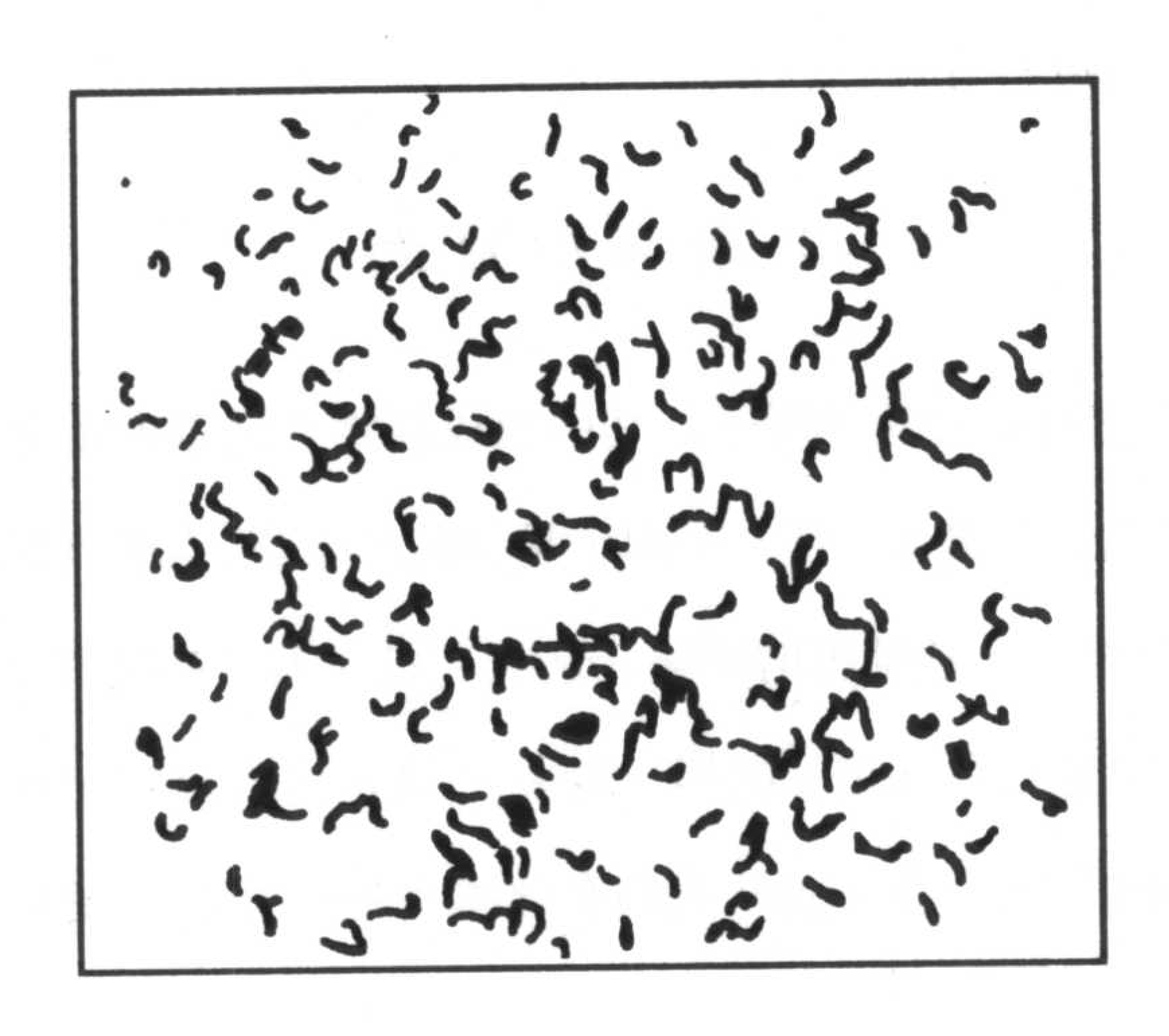
首先让我们举出两个例子,其中形成新结构之前的涨落的增长过程能被详细地追寻出来。第一个例子是粘菌的聚集,当受到饥饿的威胁时,它们便并作一个超细胞的团块。这我们已在第五章提到过。涨落作用的另一个例证是白蚁筑窝的第一阶段。这是由格拉塞(Grassé)首先描述的,迪诺伯(Deneubourg)从我们在此感兴趣的观点出发对它进行了研究。

昆虫群落中的自聚集过程 一种鞘翅目昆虫(*Dendroctonus micans* [Scol.])的幼虫最初随机地分布在两块相距2毫米的水平玻璃片之间,周边是开口的,表面积为400平方厘米。

聚集过程看来是由于两种因素的竞争:一种因素是幼虫的随机移动,另一种因素是幼虫和某种化学物质进行反应。这种化学物质是一种"外激素",是幼虫从它们据以取食的树中所含的萜烯合成出来的,每个幼虫发出这种外激素的速率与它的营养状态有关。这种外激素在空间中扩散,幼虫向外激素浓度梯度的方向移动。这种反应提供了一个自催化机制,因为当幼虫聚作一团时,加强了对相应区域的吸引作用。该区

域内幼虫的局部密度越高,外激素的浓度梯度就越大,幼虫移向聚集点的倾向就越强。

实验表明,幼虫群体密度不仅决定聚集过程的速率,还影响聚集过程的效果,即最后成团的幼虫数目。在高密度时(图 19A),在实验设置的中心处,一个团出现了,并且迅速生长。在很低的密度下(图 19B),不出现任何稳定的团。



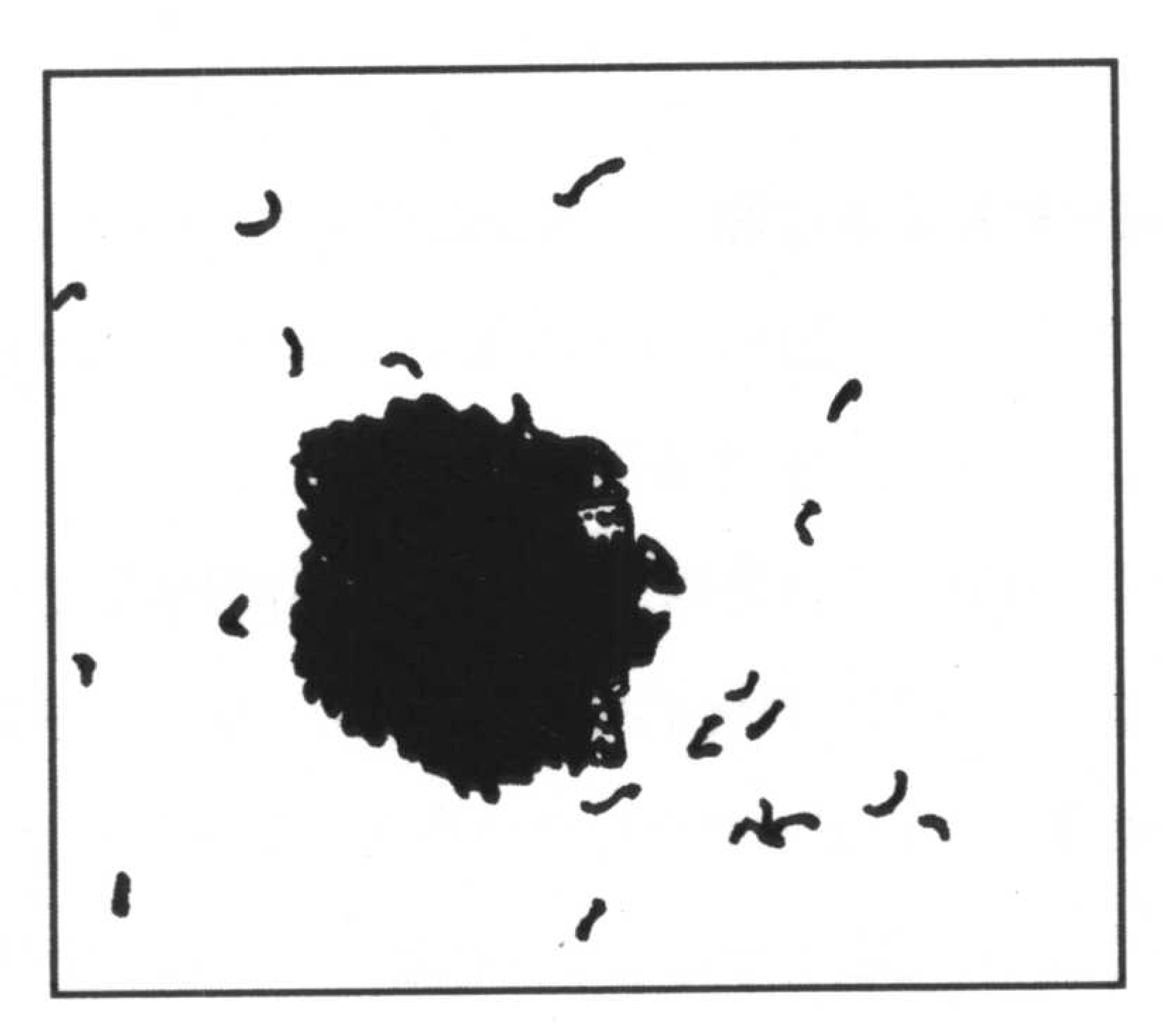
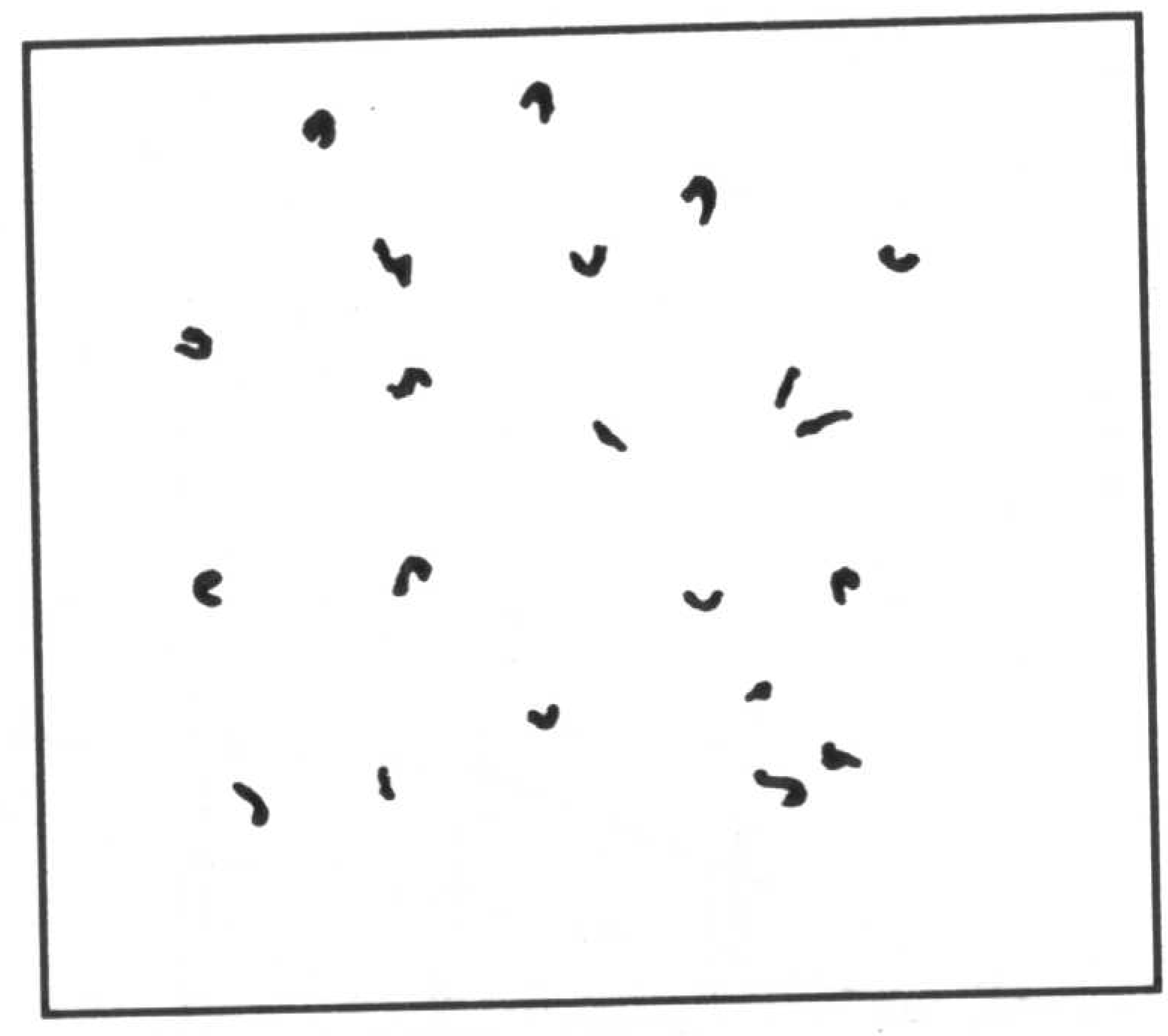


图 19A 高密度时的自聚集

时间是 0 分钟和 21 分钟。



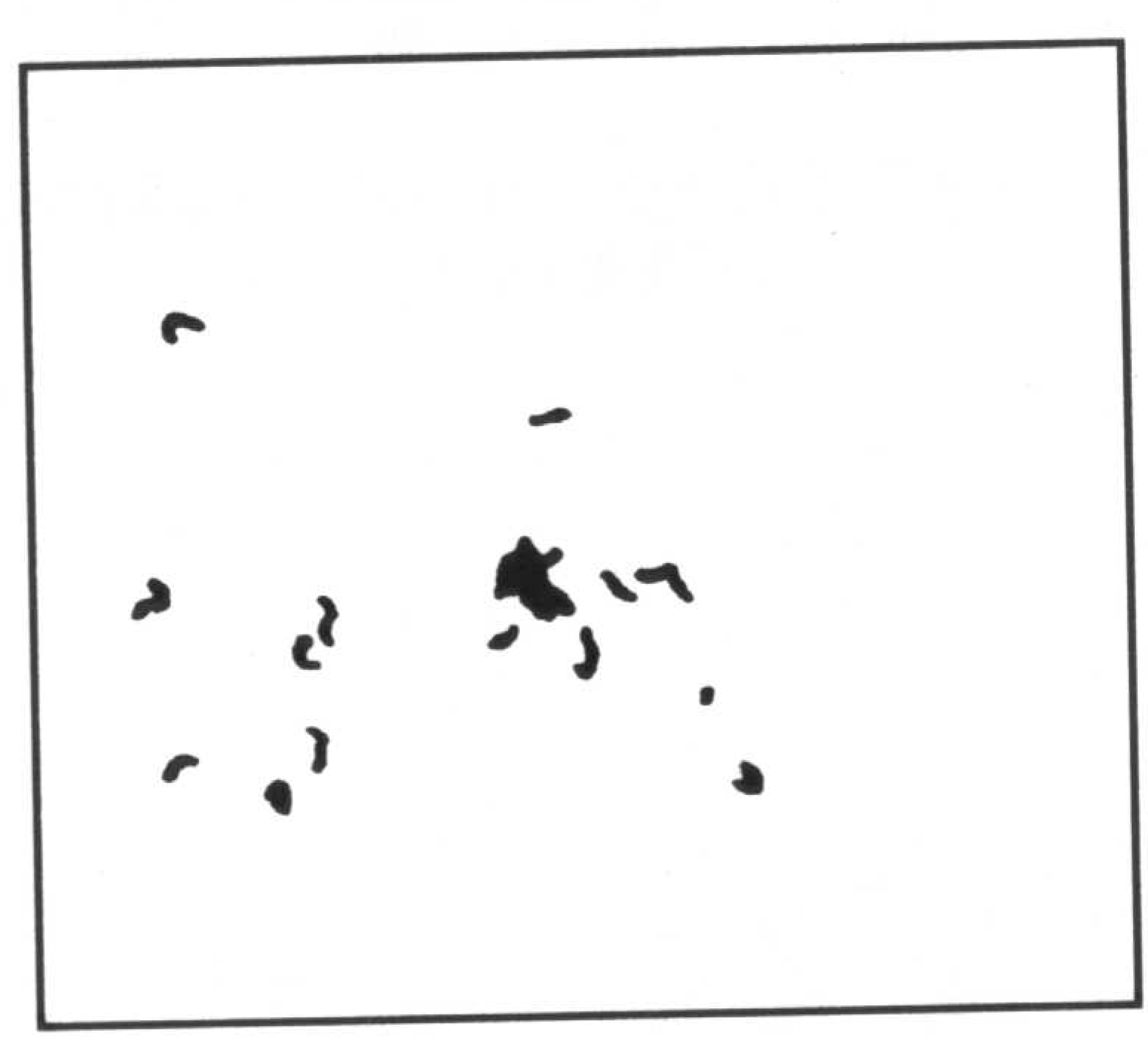


图 19B　低密度时的自聚集

时间是 0 分钟和 22 分钟。

而且，其他实验探讨了从在系统外围区域中人工建立的某个“核”出发而形成一个团的可能性。根据在这个初始核中的幼虫数目的多少，出现了不同的结果。

如果这个数目与幼虫总数相比是个较小的数，那么这个团就不会发展下去(图 19D)。如果这个数目较大，这个团就会生长(图 19E)。对于中间值的初始核，新型的结构可能发展起来：两个、三个或四个其他的团出现了并共存着，其寿命至少大于观察的时间(图 19F 和 G)。

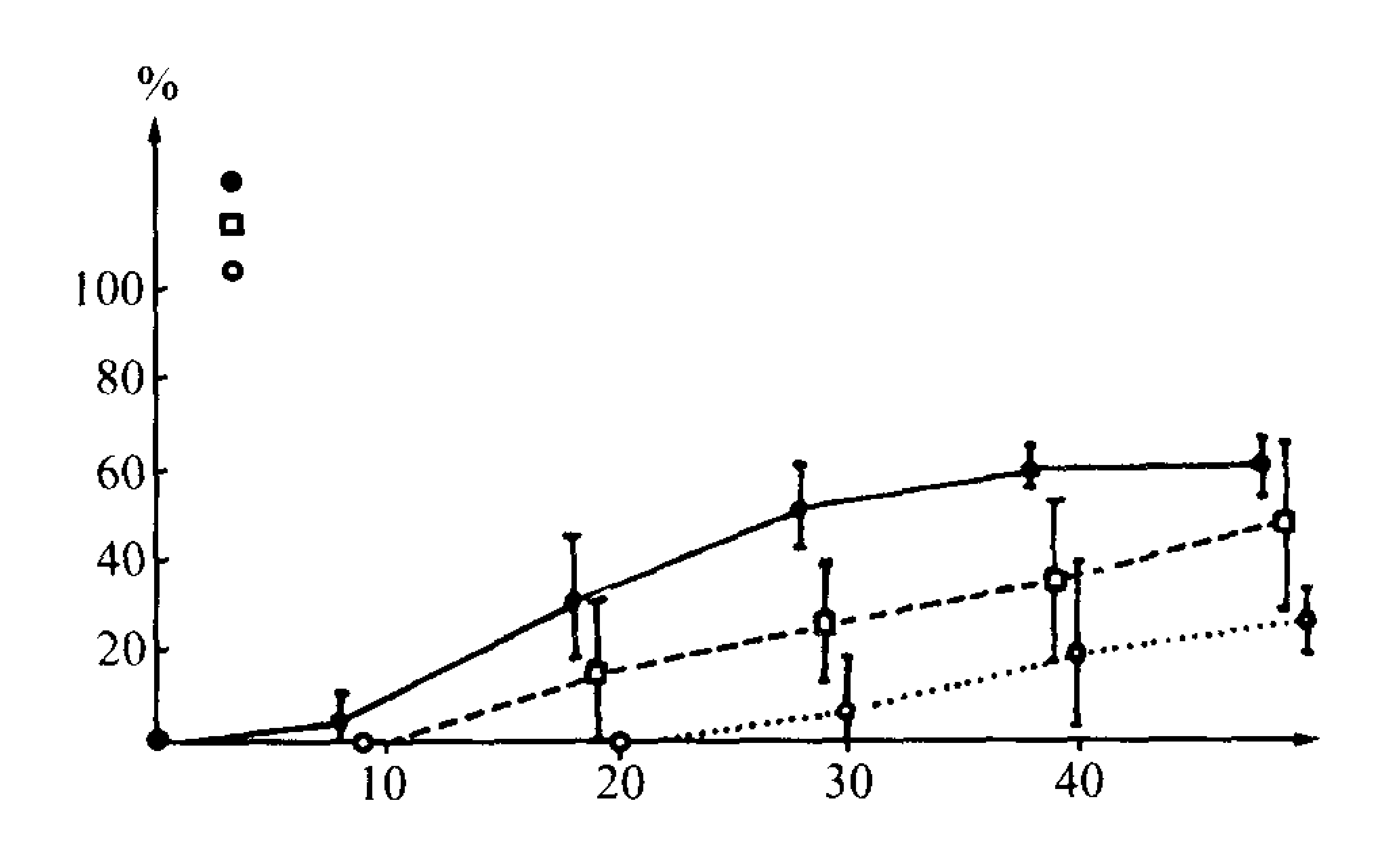


图 19C　在三种密度下，中心团处幼虫数目占总数的百分比随时间而变化的关系

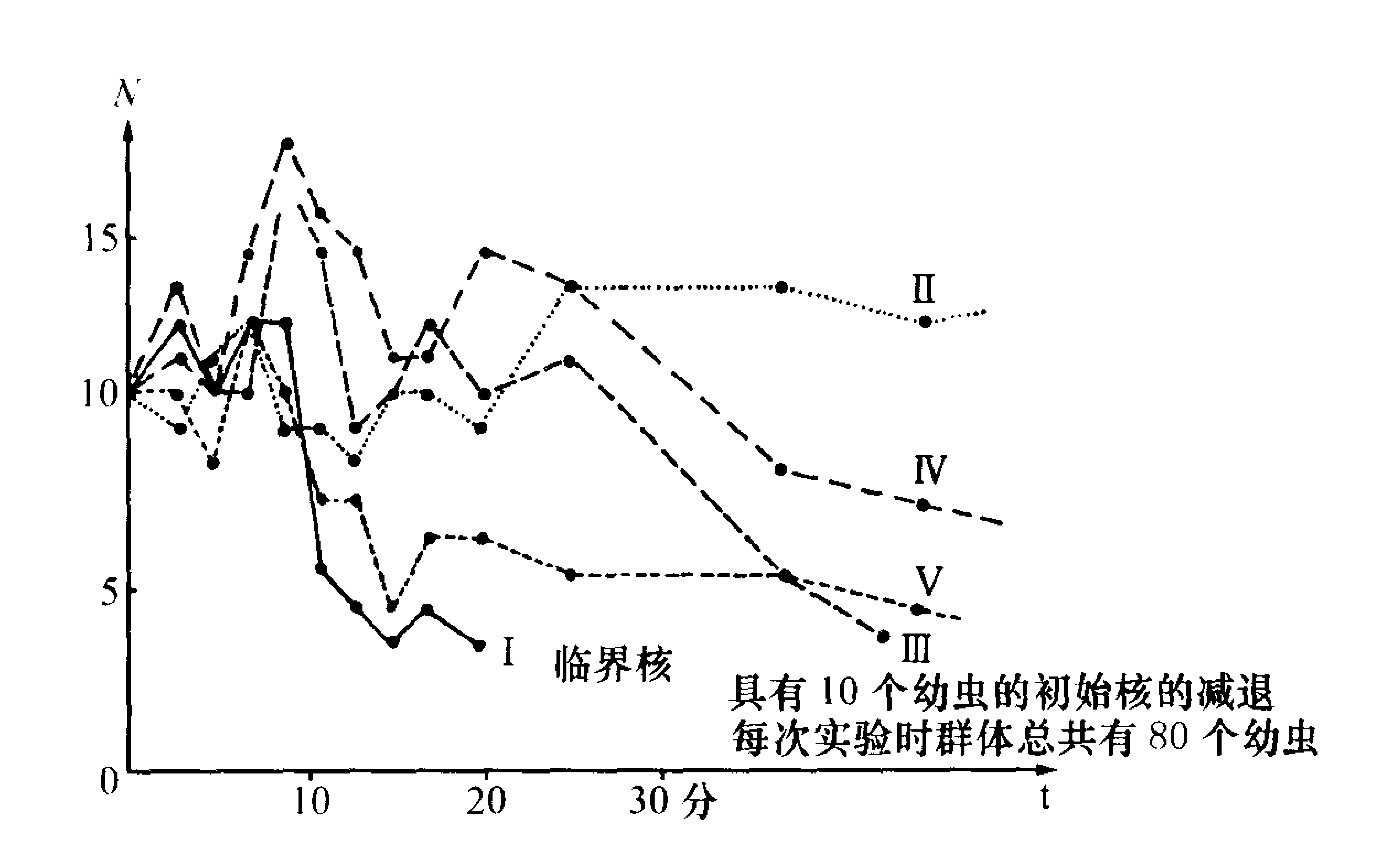


图 19D　有 10 个幼虫的初始团的衰减

群体总数为 80 个幼虫，N 是团中的幼虫数。

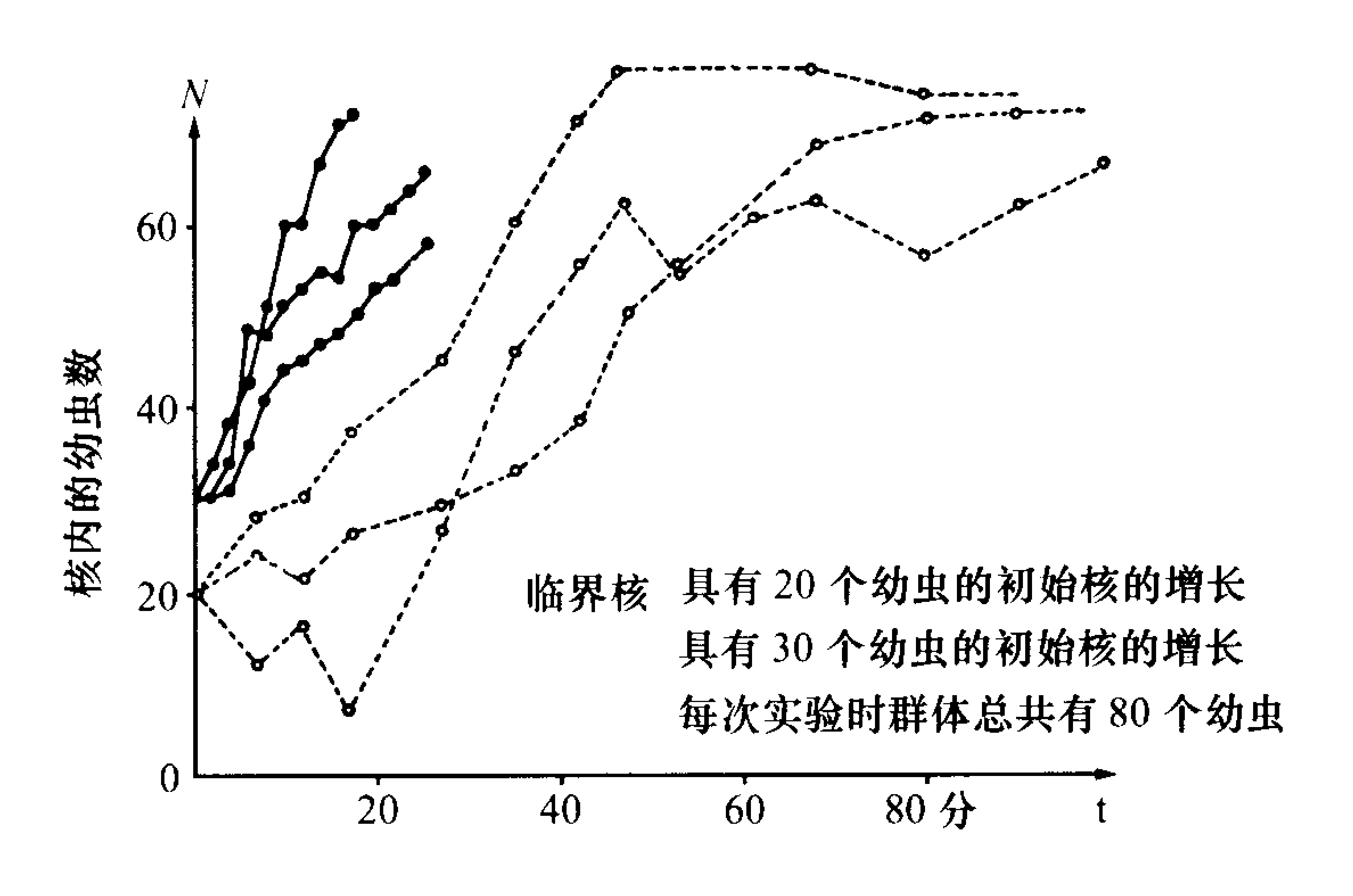


图 19E 有 20 个和 30 个幼虫的初始团的生长

群体总数为 80 个幼虫。

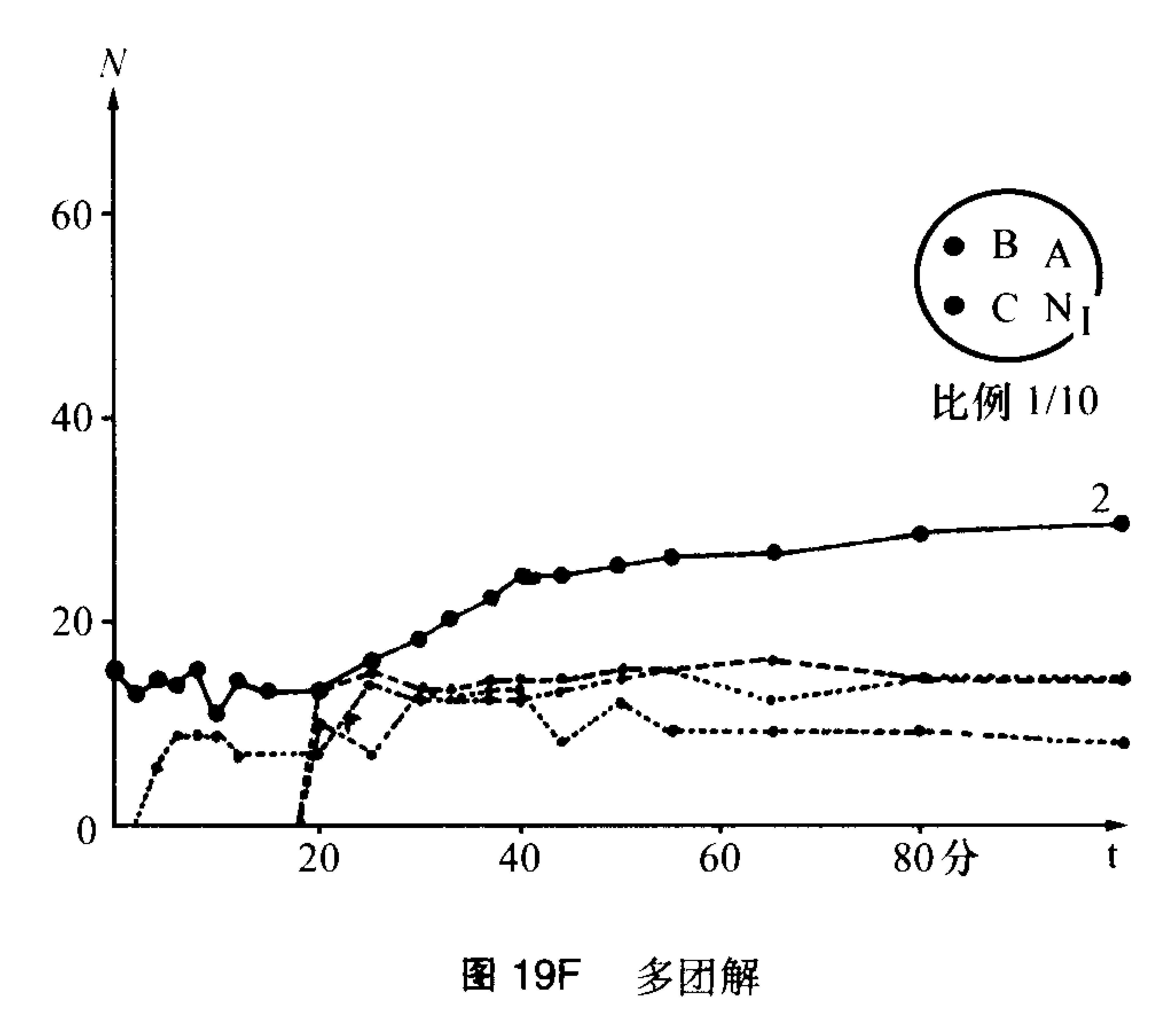
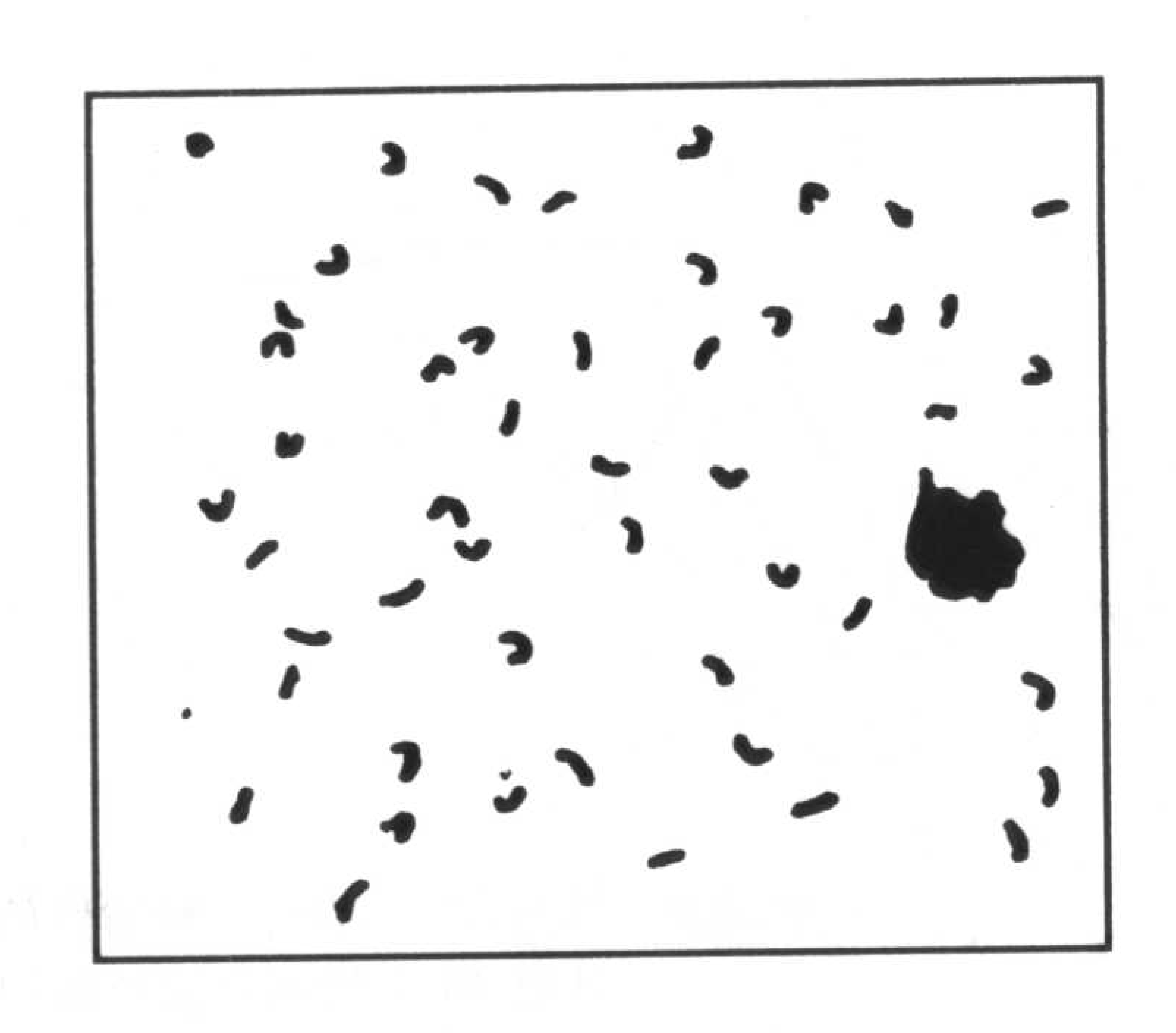


图 19F 多团解

团的初值为 15 个幼虫，群体总数为 80 个幼虫。



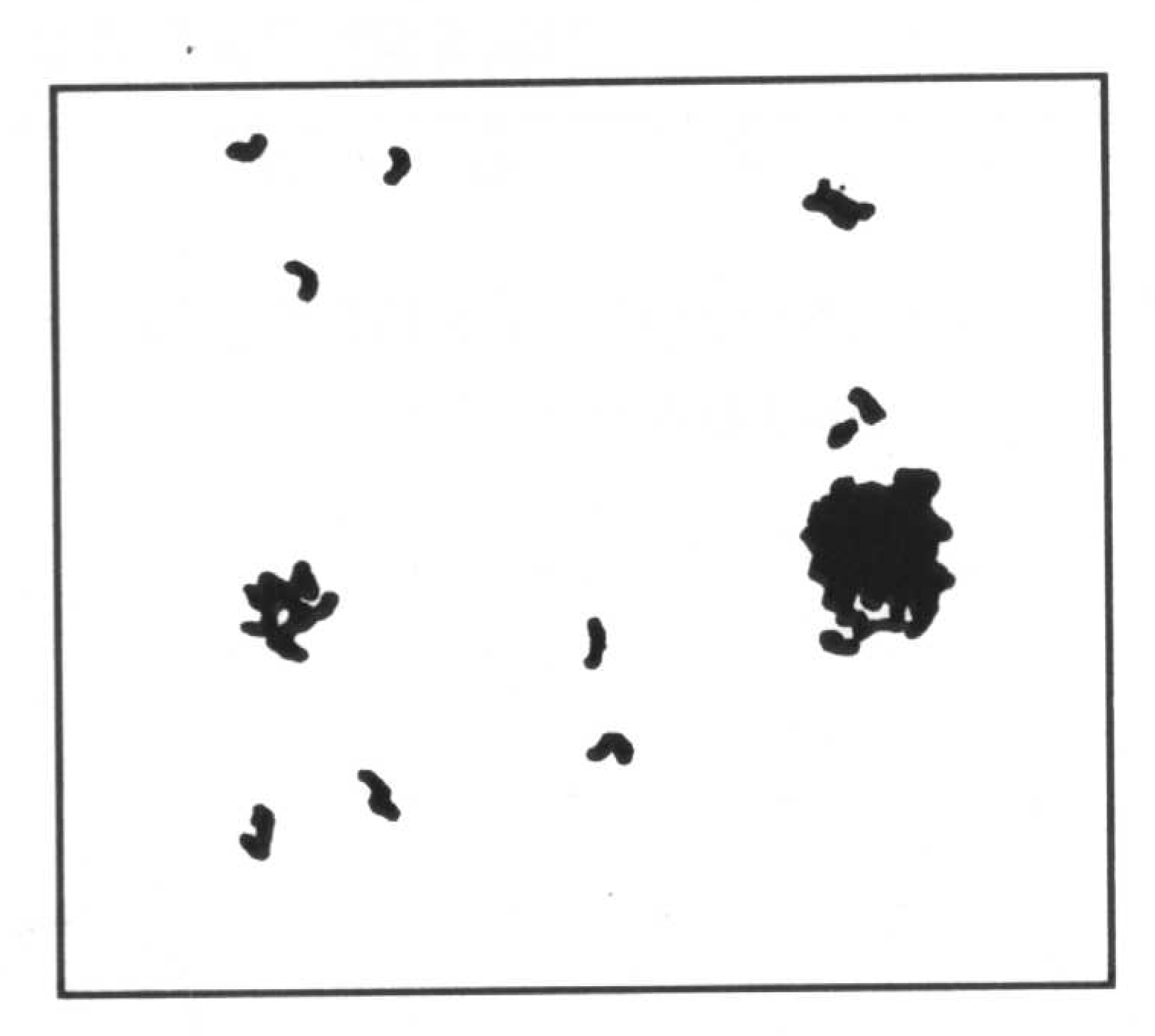


图 19G　外围引入的一个团（Ⅰ）的增长，它引起第二个小团（Ⅱ）的形成

在具有均匀初始条件的实验中，从未观察到这种多团结构。看来它们在分叉图中对应着稳定的态，这些态和决定系统特征的参量值相容，但系统从均匀条件出发则不能达到这些态。核起着有限扰动的作用，这是激发系统并把它推到分叉图中对应于多团解族的区域中去所必需的。

白蚁窝的建筑过程是谐调活动之一，这些活动引导一些科学家去推测昆虫社会中的“集体思想”。但奇怪的是，似乎在事实上白蚁只需很少的信息去参加建设如此宏伟和复杂的大厦作为它们的窝。这个活动

的第一阶段，即打基础的阶段，已被格拉塞证明是白蚁的似乎无序的行为的结果。在此阶段，白蚁以随机的方式搬运和卸放土块，但在这样做的时候，它们用激素浸湿了土块，从而能吸引其他白蚁。情形可以表示如下：初始的"涨落"是土块稍大的浓度，这件事会不可避免地在某一时刻某一地点发生。此事件的放大是由于该区域中受到稍高激素浓度吸引的白蚁密度增加而产生的。当该区域中白蚁的数目增多时，它们在那里卸放土块的概率也就增大，这反过来又使激素的浓度进一步提高。这样，一些"柱子"形成了，彼此相隔一定距离，这距离与激素散布的范围有关。类似的例子已在最近被描述过。

虽然玻耳兹曼的有序性原理使我们能够描述一些化学的或生物学的过程，其中差别被夷平，初始条件被遗忘，但它无法解释这种情形，例如在不稳定状况下的少数"决策"会使由大量相互作用的实体所组成的系统走向一个全局的结构。

当一个新的结构出自某个有限的扰动时，从一个状态引向另一个状态的涨落大概不会在一步之内就把初始状态压倒。它首先必须在一个有限的区域内把自己建立起来，然后再侵入整个空间：这里有一个成核机制。根据初始涨落区域的尺寸是低于还是高于某个临界值(在化学耗散结构的情形，这个阈值特别与动力常数及扩散系数有关)，该涨落或是衰退下去，或是进一步扩展到整个系统。我们熟悉经典相变理论中的成核现象：例如在气体中，凝结的小液滴不断地形成，又不断地蒸发。温度和压力达到某一点时液态将变成稳定的，这说明可以确定出一个临界的液滴尺寸(温度越低和压力越大，这个临界尺寸越小)。如果液滴的尺寸超过这个"成核阈"，该气体几乎一下子就转变成液体(参阅图 20)。

此外，理论研究和数字模拟表明，临界核尺寸随着连接系统各区域的扩散机制的效能而增大。换句话说，系统内部发生的通信越快，不成

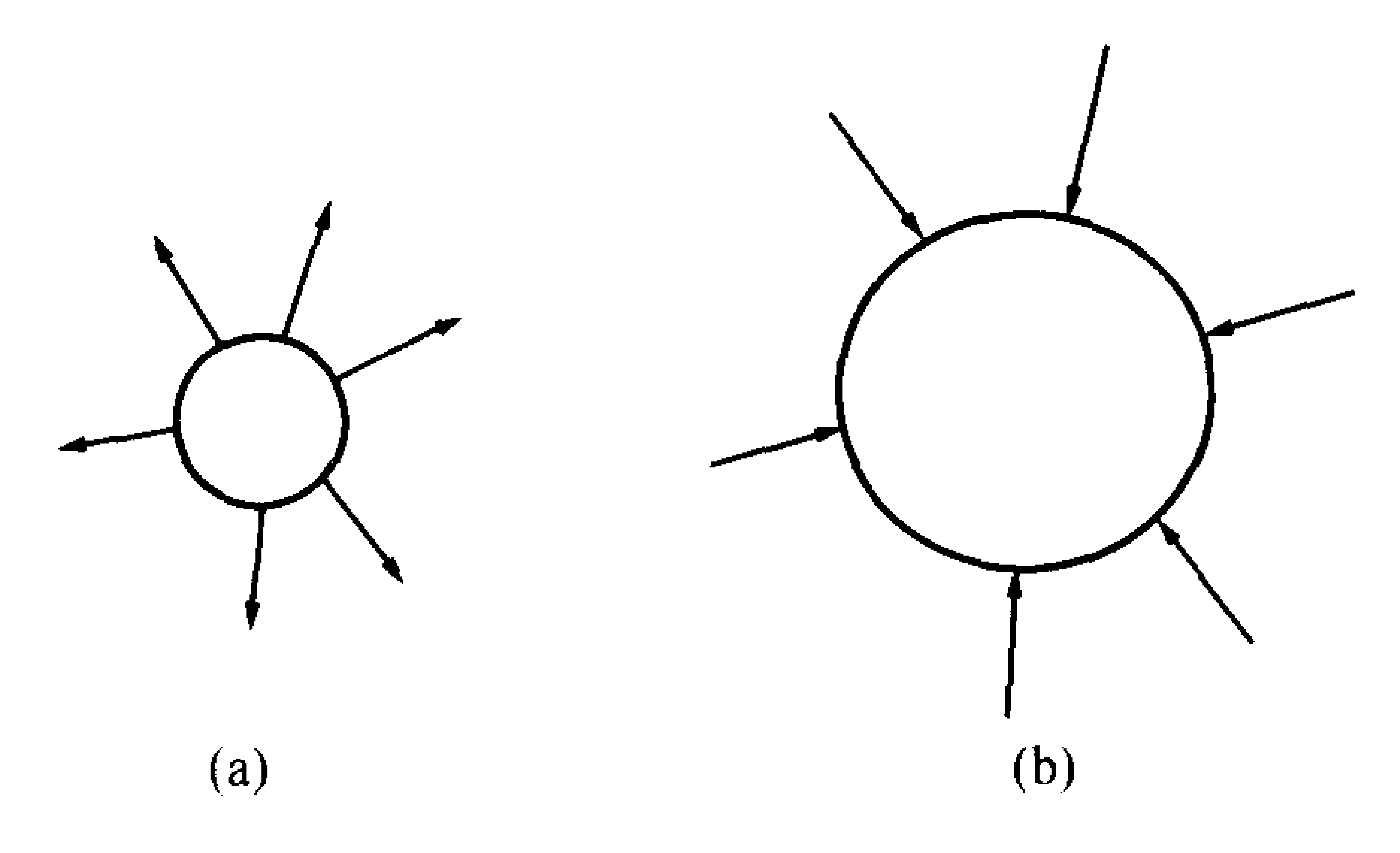


图 20　液滴在过饱和蒸汽中的成核作用

(a)液滴小于临界尺寸;(b)液滴大于临界尺寸。对于耗散结构,阈的存在已被实验验证。

功的涨落所占的百分比就越大,因而系统就越加稳定。临界尺寸问题的这一方面意味着在这种情形下,"外部世界"即涨落区域的环境总是倾向于阻尼这些涨落。根据涨落区域和外部世界之间通信的效率,涨落可能被抑制,也可能被放大。因此,临界尺寸取决于系统的"一体化能力"和放大涨落的化学机制之间的竞争。

这个模型适用于最近在对肿瘤的发生所作的试管内的实验研究中得到的结果。个别的肿瘤细胞被看作是一个"涨落",这个涨落能够通过复制而不受控制地和永久地发生和发展。然后它面对着有毒的细胞群体,有毒细胞群体可能成功地把它消灭,也可能遭到失败。跟踪复制过程和破坏过程的不同的特征参量值,我们可以预言该肿瘤是衰亡还是放大。这类动力学的研究使我们认识到有毒细胞和肿瘤之间相互作用的一些意想不到的特点。似乎有毒细胞会将死亡的和活着的肿瘤细胞混淆起来,结果使得癌细胞的消灭越来越困难。

复杂性的限度问题经常被提起。的确,系统越复杂,威胁系统稳定性的涨落的类型就越多。那么,人们会问:像生态组织或人类组织那样复杂的系统怎么可能存在呢?它们怎样设法去避免永久的混沌呢?通信的稳定化作用,扩散过程的稳定化作用,可能是对这些问题的一个不全

面的回答。在复杂的系统中，物种和个体以多种不同的方式相互作用着，系统的各个部分间的扩散和通信大概都是有效的。通过通信的稳定化与通过涨落的不稳定性之间存在着竞争，竞争的结果决定着稳定性的阈。

4 结构稳定性

什么时候我们才能开始谈论“进化”的本来意义呢?我们已经看到，耗散结构需要远离平衡的条件。但反应扩散方程包含着能被移回近平衡条件的参量。系统可以在两个方向上考察分叉图。同样，一个液体可以从片流转变成湍流并转变回去。这里没有涉及任何确定的进化模式。

对于包含系统尺寸作为分叉参量的那些模型，情形完全不同了。这里，随着时间而不可逆地发生的增长产生一种不可逆的进化。但这仍然是个特例，即使可能和形态发生学的发展有关。

无论在生物学的、生态学的或社会的进化中，确定的一组相互作用着的单元，或是这些单元的确定的一组变化，我们都不能认作是给定的。因此系统的定义易于被它的进化所变更。这种进化的最简单例子和结构稳定性的概念联系着。它关系着一个给定系统对于引入一些能借助于参加该系统的过程而繁殖的新单元所作的反应。

和这类变化相对，系统的稳定性问题可以被表述如下：以小数量加入的新组分引起系统成分之间的一组新的反应。这组新的反应便进入和系统原先的活动方式的竞争。如果系统对这一入侵来说是“结构稳定”的，新的活动方式将不能自己建立起来，而且这些“革新者”将无法活下去。但是，如果结构涨落成功地施加自己的影响，例如，假如这些“革新者”赖以繁殖的动力学是足够迅速，使它们可以侵入该系统而不

是被消灭，那么整个系统将采取一种新的活动方式：其行为将由一种新的"句法"所控制。

这种情况的最简单的例子是通过在被供应着单子 A 和 B 的某个系统内部进行的聚合作用而再生的大分子的一个群体。我们假定这个聚合过程是自催化的，就是说，已合成的聚合物被用作一个模型，来形成一个具有同样序列的链。这种合成比起没有模型可照抄的合成来要快得多。以 A 和 B 的某个特定的序列为特征的每一种聚合物，可以由一组参量来描述，这些参量测量着聚合物所催化的复制合成的速度，复制过程的精度，和大分子本身的平均寿命。可以证明，在一定的条件下，具有比如说序列 *ABABABA*…的单一类型的聚合物统治着该群体，其他的聚合物对于第一种聚合物来说，被减少到只是一些"涨落"。每一次都要出现结构稳定性的问题：由于复制时的"错误"，一种新型的聚合物在系统中出现并开始繁殖，这新型聚合物以一种至此未知的序列和一组新的参量为特征，并为了可用的 A 和 B 单子而和占优势的物种竞争着。这里，我们遇到了"适者生存"这个经典达尔文思想的一个基本例子。

这种思想构成了由艾根*及其合作者所发展的前生物进化模型的基础。艾根论证的详情可以方便地在别处找到。我们简短地说一下，它像是要证明，只有一种系统可以抵制这个自催化群体不断产生的"错误"，就是对任何可能的"突变性聚合物"来说是结构稳定的聚合物系统。这个系统由两组聚合物分子组成。第一组分子属于"核酸"的类型：每个分子都能再生其自身并在第二组分子的合成中起催化剂的作用。第二组分子属于蛋白质的类型：每个分子催化着第一组分子的自我再生。这种在两组分子间存在的横向催化联系可能产生一个循环(每个"核

* 艾根(M.Eigen, 1927—)，德国物理学家，1967年获诺贝尔化学奖。——译者

酸"在一个"蛋白质"的帮助下重新生成它自己)。于是,它能够稳定地生存下去,抵制具有较高再生率的新聚合物的不断出现:事实上,没有任何东西能够侵入由"蛋白质"和"核酸"组成的自复制循环。这样,一种新型的进化可能在这个稳定的基础上开始生长,传达着遗传密码。

艾根的方法肯定会引起人们极大的兴趣。在具有有限容量的环境中,达尔文对准确的自再生的选择当然是重要的。但我们倾向于相信这不是前生物进化中所包括的惟一的方面。和能流与物流的临界数量有关的"远离平衡"的条件也是重要的。看来有理由假定,走向生命的某些初始阶段联系着能够吸收和转换化学能从而把系统推入"远离平衡"条件的机制的形成。在这个阶段,生命,或"前生命",可能是如此淡薄,以致达尔文选择没有起到它在较后阶段中所起的主要作用。

本书的大部分篇幅都以微观和宏观间的关系为中心。进化理论中最重要的问题之一是宏观结构和微观事件间可能发生的反馈:来自微观事件的宏观结构会反过来导致微观机制的改变。奇怪的是,在现在,被认识得较好的例子与社会的情形有关。当我们建设一条道路或一座桥梁时,我们可以预言这将怎样影响公众的行为,以及这将怎样转而决定该区域内通信方式的其他改变。这种相互有关的过程产生出极为复杂的情况,在作出任何类型的模型之前必须认识这些情况。这就是为什么我们现在要描述的还只是十分简单的情况的原因。

5 逻辑斯谛进化

在社会的例子里,结构稳定性的问题有大量的应用。但必须强调,这些应用隐含着对一种情况的极大的简化,这种情况是用那些在只有有限必要资源的环境中的自复制过程间的竞争来简单定义的。

在生态学中，解决这一问题的经典方程被称做“逻辑斯谛方程”。这种方程描述一个含有 N 个个体的群体的进化，考虑出生率、死亡率和可用于该群体的资源总量。逻辑斯谛方程可以写作 $dN/dt = rN(K-N) - mN$，其中 r 和 m 是特征出生常数和特征死亡常数，K 是环境的“运载能力”。无论 N 的初值是什么，随着时间的推移，它将达到稳恒态值 $N=K-m/r$，此值由运载能力与死亡常数和出生常数之比的差来决定。当达到此值时，环境达到饱和，在每一瞬间，死亡的个体和出生的个体同样多(参阅图 21)。

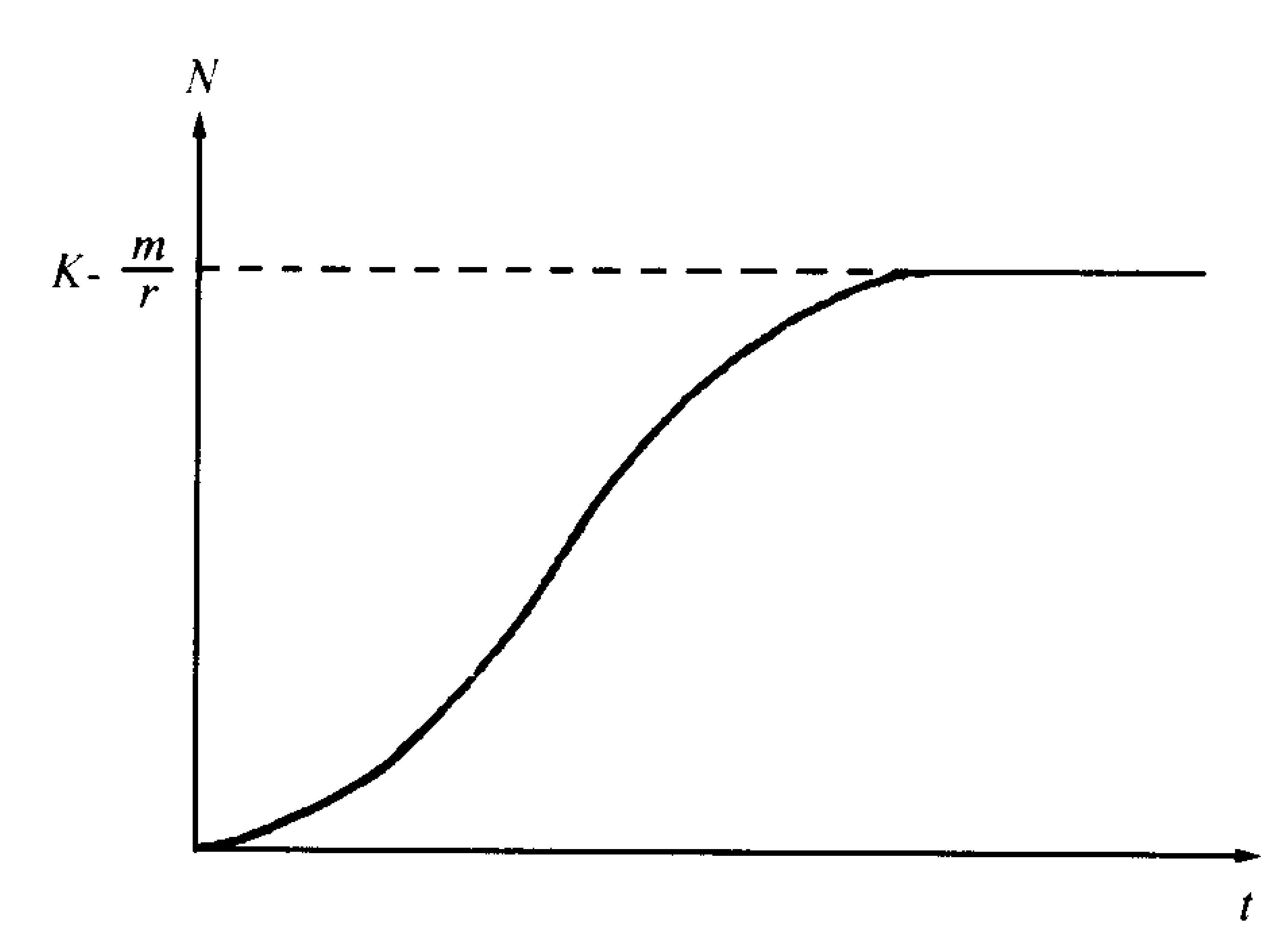


图 21 依照逻辑斯谛曲线，群体 N 的进化与时间 t 的函数关系

对于 N 的涨落而言，$N=0$ 的定态是不稳定的，而 $N=K-m/r$ 的定态是稳定的。

逻辑斯谛方程表面上的简单性在某种程度上隐藏了所涉及的机制的复杂性。我们已经提到例如外部噪声的作用。在这里，它具有特别简单的含义。显然，如果只是由于气候的涨落，那么系数 K，m 和 r 不能被看作是常数。我们知道，这种涨落可能完全把生态平衡搅乱，甚至驱使该群体灭绝。当然，比如说食物的贮存和新群落的形成等新的过程可能因此而开始，并终于演变得使外部涨落的一些作用可以被避免。

但是还不止于此。我们不把逻辑斯谛方程写成对时间来说是连续的，而比较一下相隔固定时间(例如一年)的群体数。这种“离散”的逻辑斯谛方程可写成 $N_{t+1}=N_t[1+r(1-N_t/K)]$ 的形式，其中 N_t 和 N_{t+1} 是相隔一年的两个群体数(这里我们略去了死亡项)。梅(R.May)所注意到的显著特点是，尽管这样的方程很简单，但它们允许有使人感到迷惑的那么多个解。对于 $0\leq r\leq 2$ 的参量值来说，如在连续的情形一样，我们得到均匀地趋向平衡态的现象。当 r 的值小于 2.444 时，一个极限环开始：我们现在得到以两年为周期的周期行为。其后是四年、八年等等的循环，直到行为只能被描述成是混沌的(如果 r 大于 2.57)。这里我们有一个如在第五章第 7 节中所描述过的向混沌的过渡。这个混沌是否一定出现?最近的研究似乎指出，刻画自然群体数的参量保持它们不在混沌区域中。为什么会这样? 这里我们有一个由进化问题和计算机仿真产生的数学互相汇合所引出的非常有趣的问题。

直到现在，我们采取的是一种静止的观点。现在让我们转到在生物或生态进化期间使参量 K、r 和 m 可能变化的那些机制上来。

我们必须期望，在进化期间，生态参量 K、r 和 m 将是变化的(还有其他许多参量和变量，无论是否能将它们数量化)。活着的社会不断地引入利用现存资源或开发新资源的新方法(即 K 增大)，并不断地发现延长寿命或更快繁殖的新方法。因此每个由逻辑斯谛方程确定的生态平衡都只是暂时性的，一个逻辑斯谛上确定的小生境将被一系列物种相继地占有，每个物种都能在其利用这个小生境的“能力”(以数量 $K-m/r$ 来量度)变得更大时取代前一物种(见图 22)。因此，逻辑斯谛方程导致一个非常简单的情形的确定，在那里我们可以为“适者生存”这个达尔文思想给出一个定量的表述。“适者”就是在给定时刻量 $K-m/r$ 最大的那个物种。

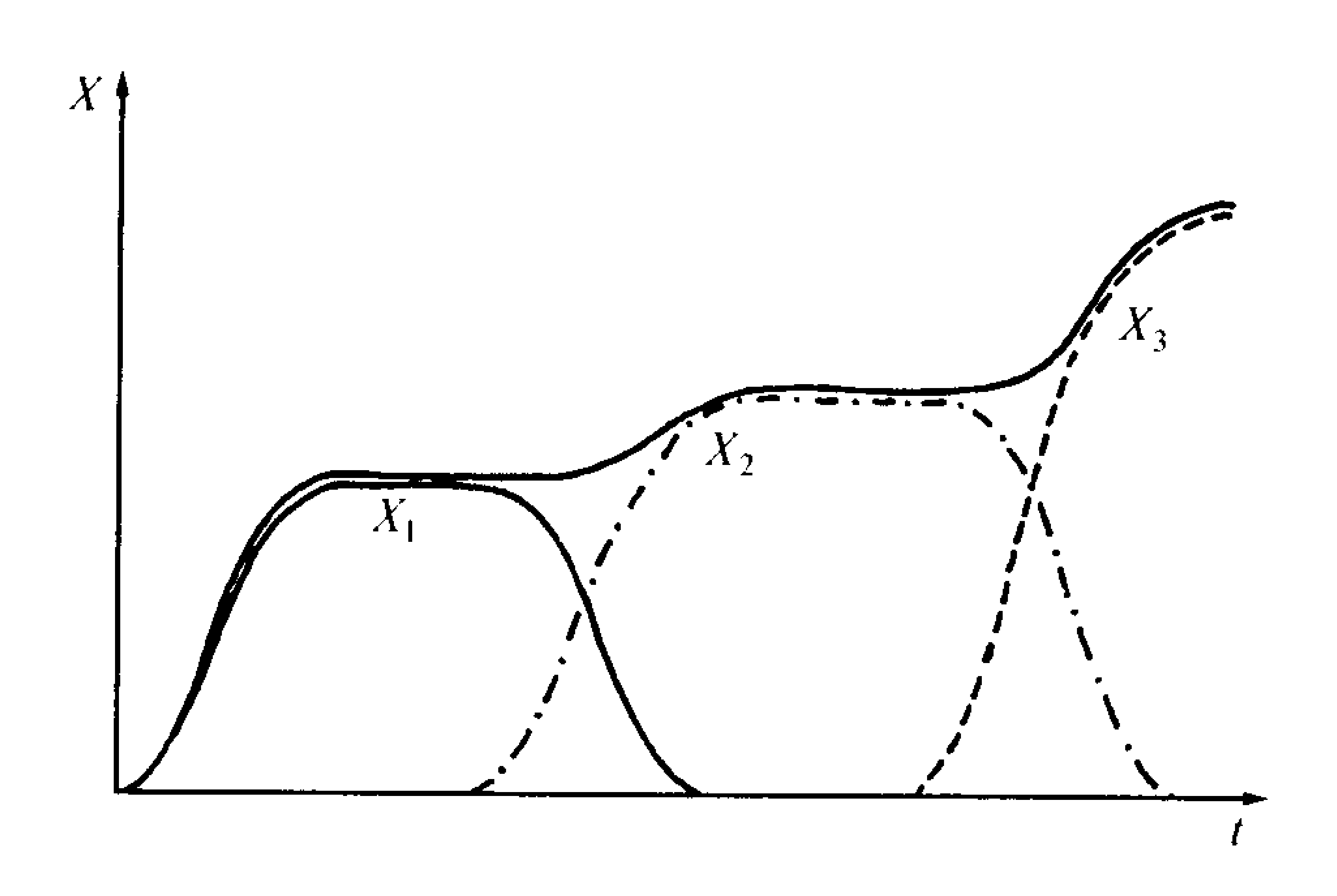


图 22　总群体数 X 的进化作为时间的函数

群体是由物种 X_1、X_2 和 X_3 组成的，它们相继出现，并以 $K-m/r$ 值的不断增大为特征(见正文)。

尽管用逻辑斯谛方程描述的问题受到限制，它还是导出了表现自然创造力的一些惊人的例子。

让我们举出毛虫的例子，它们必须保持不被发现，因为它们运动缓慢使得它们不可能逃跑。

使用毒物和有刺激性的毛发和棘突，以及用恐吓的表示，这些进化的战略可以十分有效地驱走鸟和别的潜在捕食者。但是没有一种战略是对所有捕食者同时都有效的，特别是当某个捕食者是足够饥饿的时候。理想的战略是保持完全不被发现。有些毛虫接近了这个理想，数百种蝶类物种所采用的保持不被发现的战略是多种多样和很老练的，这使我们想起十九世纪著名博物学家路易斯 · 阿加西斯(Louis Agassiz)的一段话："存在的可能性是如此深深地趋向过分，以至很难有任何概念是太不寻常，为大自然所无法实现的。"

我们不能不给出一个米尔顿 · 洛夫(Milton Love)报告过的例子。羊肝吸虫必须从蚂蚁身上转移到羊身上，才能最终在那里再生它自己。羊吞食一个受到感染的蚂蚁的机会很小，但那蚂蚁的行为方式是惊人的：

它竟能使它遇到羊的概率成为最大。吸虫真是“绑架”了它的主人。它钻入蚂蚁的脑子，迫使它的牺牲者以自杀的方式去行动：被抓获的蚂蚁不是停在地上，而是爬到草叶的尖上，在那里一动不动地等着羊。这真是解决寄生问题的一个难以置信地“聪明”的办法。它是怎么被选择的，始终是个谜。

利用和逻辑斯谛方程类似的模型可以研究生物进化中的其他情形。例如，有可能计算出中间物种竞争的条件，在此条件下，对于一部分群体来说，在尚武的和非生产性的活动方面专门化(例如，在群居的昆虫中的“战士”)是有利的。我们还能确定出这样的一种环境，其中变成专门化的、限制其食物资源范围的物种将比未专门化的、消耗较宽范围资源的物种更容易生存下去。但这里我们正在处理的是十分不同的问题，这些问题是与内部分化群体的组织有关的。如果我们想避免混沌，清晰的区分是绝对必要的。当群体中的个体是不能互换的，每一个体有其自己的记忆、特性和经验，并被召来起一种独特的作用时，逻辑斯谛方程的关系，以及更一般地任何简单的达尔文推理的关系，都变得非常具有相对性。我们将回到这个问题上来。

值得注意的是：图 22 所示曲线表明具有增大的 $K - m/r$ 的一个给定的逻辑斯谛方程族所确定的一系列增长和峰值，这种曲线也被用来描述某些技术过程或产物的增多。这里，发现或引进一种新技术或新产品也打破了某种社会、技术或经济的平衡。这一平衡相当于技术或产品的增长曲线所达到的最大值，这些技术或产品是发明创造将不得不与之竞争的，并且它们在该方程所描述的情形中起着类似的作用。因此，只举一例：汽船的发展不但导致绝大多数帆船的消失，而且通过降低运输成本和提高航行速度，引起海上运输需求(“K”)的增高，结果增加了船的数目。这里，我们显然是表达了一种极为简单的情况，假定这情形是

被纯经济逻辑控制着。事实上，在这种场合，发明创造看来仅仅满足了某个预先存在的、保持不变的需要，虽然是用了不同的方式。但是，在生态学中，就像在人类社会中一样，没有这种预先存在的“小生境”，许多发明也都是成功的。这样的发明改造了它们所在的环境，而且随着它们的扩展，它们创造了使它们本身增多所需要的条件，即它们的“小生境”。特别是在社会情形中，“需求”的建立，甚至达到这一需求的“要求”的建立，常表现出和满足需求的货物或技术的生产有关。

6 进化反馈

迈向说明进化过程的这一维的第一步可以这样完成，即把系统的“运载能力”作为它被利用的方法的函数，而不是把它看作是给定的。

这样，经济活动的一些补充的维数，特别是“倍增效应”，可以被表现出来。因此，我们能描述系统的自加速性质和不同层次的活动间的空间分化。

地理学家已经构造出一种与这些过程有关的模型，即克里斯塔勒* 模型，它定义了经济活动中心的最优空间分布。重要的中心位于一个六角形网络的交点，每一中心都被一个由次最小城镇组成的环所包围，如此等等。显然，在实际情形中，这种有规则的层次分布是很少见的：历史的、政治的和地理的因素很多，破坏着空间的对称性。但还不止于此。即使非对称发展的一切重要根源都被排除，我们从一个均匀的经济和地理空间出发，但只要建立起生成如克里斯塔勒所定义的那种分布的模型，就能使他所描述的那种静态的最优化成为该过程的一个可能的但

* 克里斯塔勒(Christaller,1893—1969)，德国地理学家，地理计量学派奠基人。——译者

不大会有的结果(参阅图 23)。

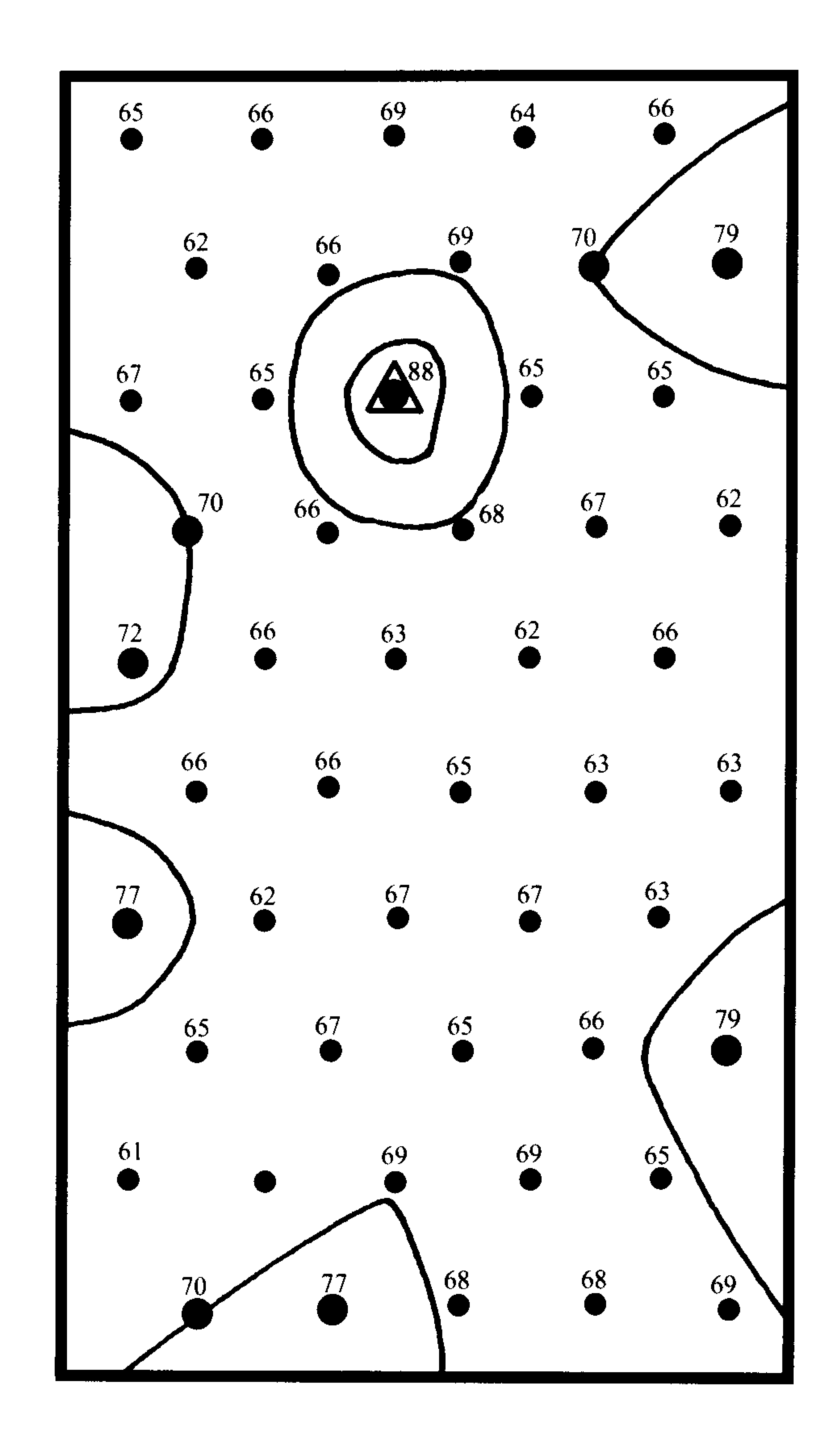


图 23A “城市化”的一种可能的历史

·只有功能 1；• 有功能 1 和 2；△有功能1,2 和 3。△ 是最大的中心,具有功能 1,

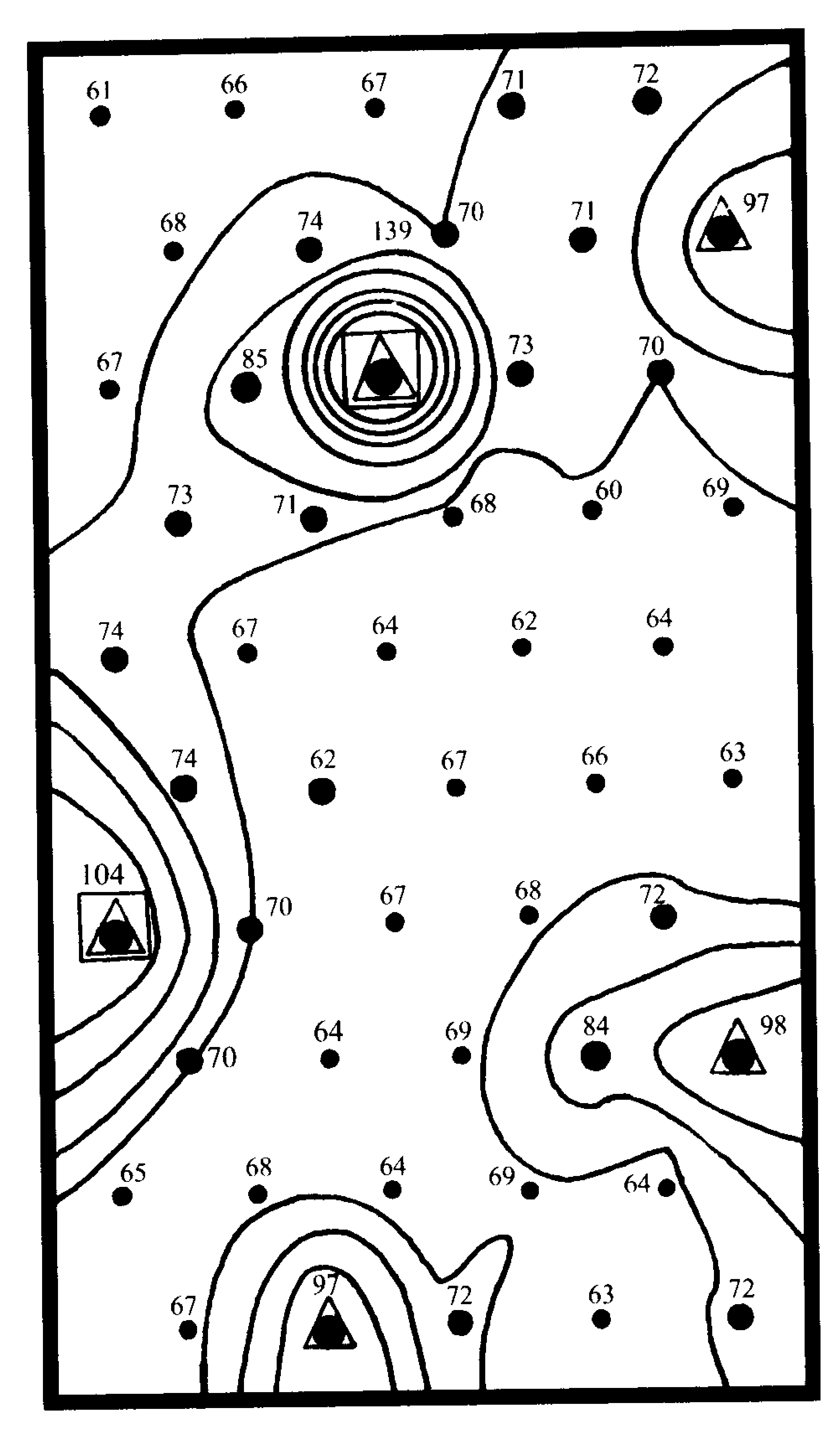


图 23B

2,3 和 4。在 t=0(没有表示出),所有的点都具有 67 单位的"人口"。在第三幅图

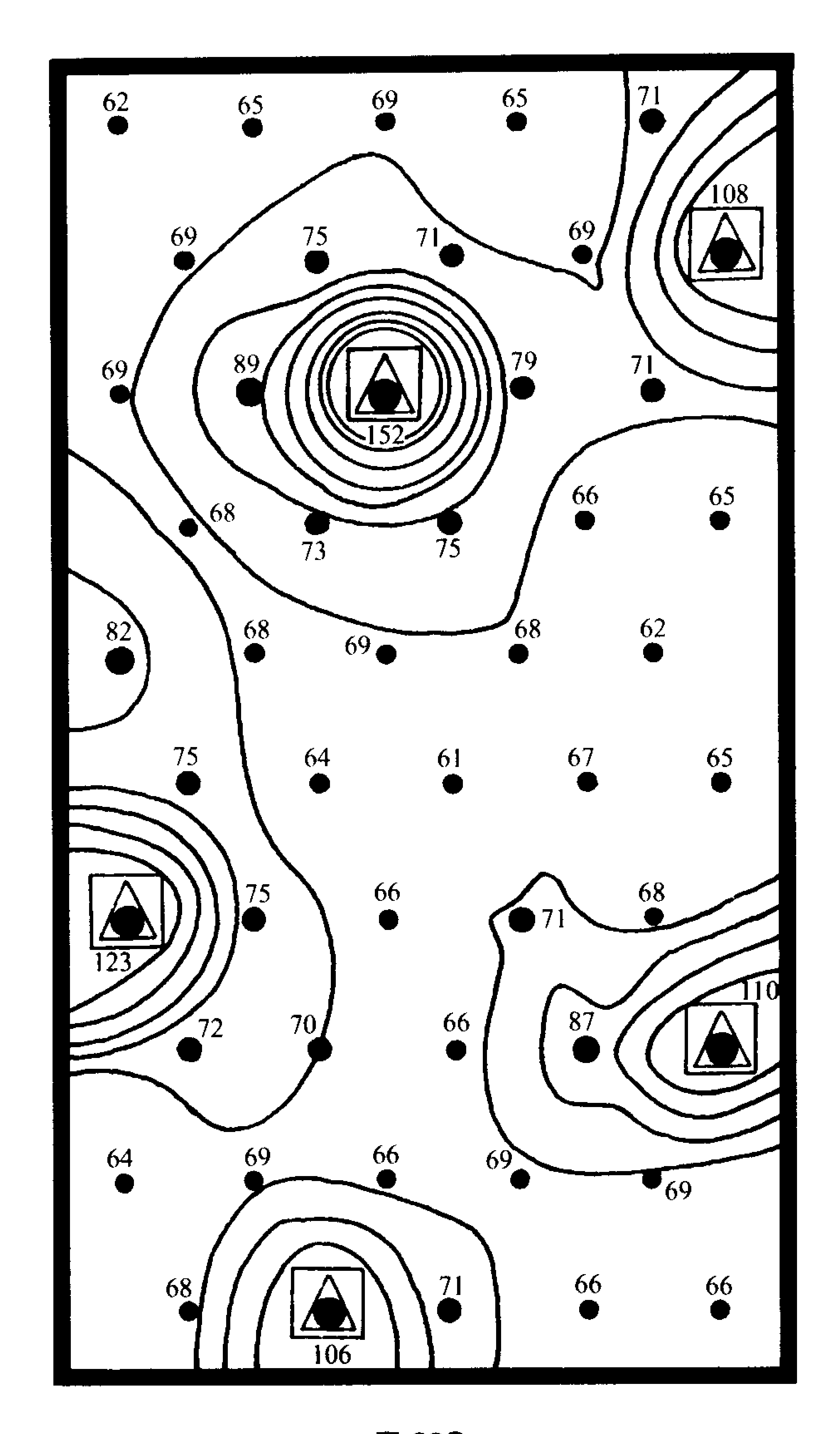


图 23C

上，最大的中心正通过一个最大值(152 个人口单位)；随后是“城市延伸”，建立卫星城；这也发生在第二大中心周围。

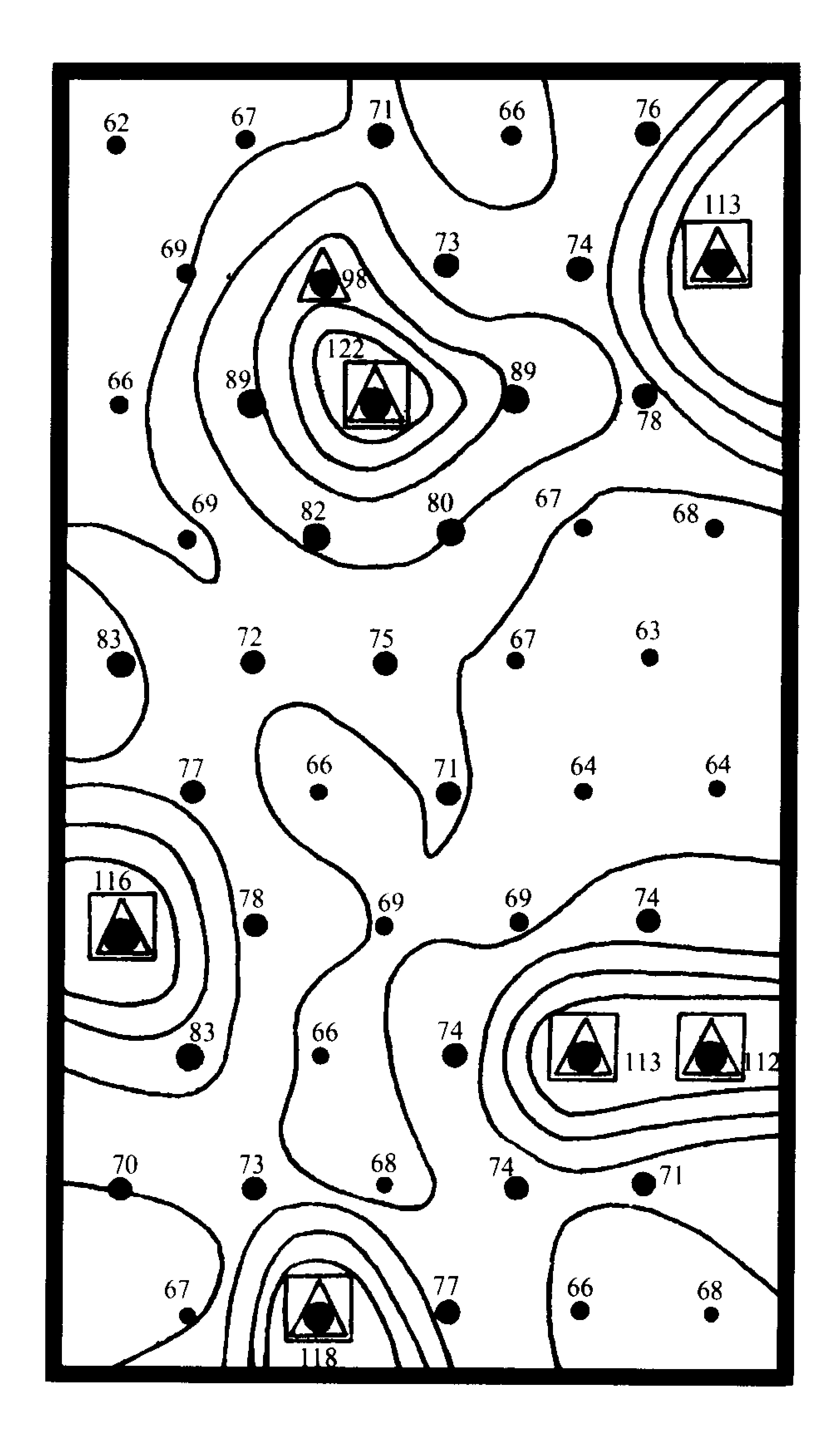

62
67
71
66
76
113
69
98
73
74
122
66
89
89
78
69
82
80
67
68
83
72
75
67
63
77
66
71
64
64
116
78
69
69
74
83
66
74
113
112
70
73
68
74
71
67
118
77
66
68

图 23D

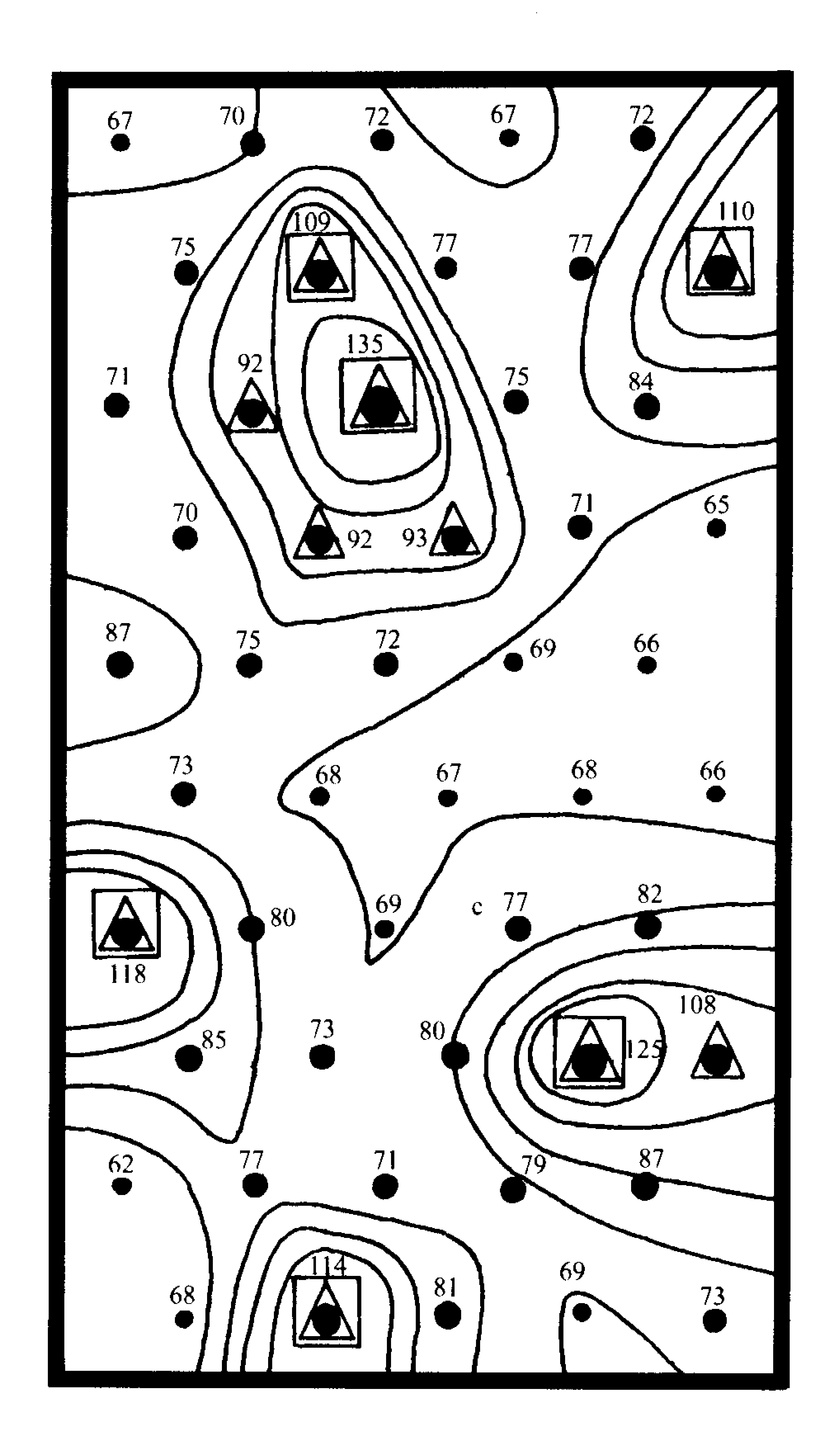

67
70
72
67
72
109
110
75
77
77
135
92
71
75
84
70
92
93
71
65
87
75
72
69
66
73
68
67
68
66
c
77
80
69
82
118
108
73
80
85
125
62
77
71
79
87
114
69
68
81
73

图 23E

所讨论的模型只推出了最小的一组例如克里斯塔勒计算所隐含的变量。一组推广了逻辑斯谛方程的方程被构造出来，从这样的基本假定出发：人口倾向于作为地方经济活动水平的一个函数而迁移，这些地方水平因而定义了一种局部的“运载能力”，在此处约化成一种“就业”能力。但地方的人口也是地方所产货物的潜在消费者。事实上，对于地方的发展，我们有一个加倍的正反馈，称作“城市倍增器”：地方人口和由已达到的活动水平所产生的经济基础结构，都加速这种活动的增长。但每一地方活动水平也由和位于别处的类似的活动中心的竞争所决定。产品销售和服务取决于把产品运输给消费者的成本，并取决于“企业”的规模。每一个这种企业的扩大与这个扩大本身帮助开创的并为之而竞争的一种需求有关。这样，人口和制造或服务活动的各自增长就被强的反馈和非线性连在一起。

该模型从一个假设的初始条件出发，其中“水平 1”的活动(乡村)在不同的点上存在着；然后，我们可以跟踪各种活动的相继展开，这些活动相当于克里斯塔勒层次中的“较高”水平，就是说，隐含着在更大范围上的出口。即使初始状态相当均匀，该模型表明，仅仅是偶然因素(即不能由该模型控制的因素，如不同企业开设的地点和时间)的作用，就足以产生对称的破缺：活动高度集中地带出现，同时其他地带的经济活动遭受减损，人口减少。不同的计算机模拟表明了增长和衰退，捕获和占优势，更替发展获得机会的时期，随后是现存主导结构的巩固。

克里斯塔勒的对称分布忽略了历史，而这里的方案倒是考虑了历史，至少在很小的意义上，把历史看成是在此情形中具有纯经济性质的“规律”和支配着发展顺序的“机遇”之间的一种相互作用。

7　复杂性的模型化

尽管我们的模型很简单，但它还是成功地说明了复杂系统进化的某些性质，特别是说明了“控制”由多个相互作用着的因素所决定的发展的困难。每一个体的活动或每一局部的相互干涉都具有集体的一方面，这一方面可以引出完全无法预料的全局变化。如瓦丁顿所强调的，关于复杂系统可能如何对一给定变化作出响应，我们现在只有很少的理解。这个响应常常和我们的直觉相反。“反直觉”这个术语是麻省理工学院为表达我们的挫折而引入的：“这倒霉的东西刚好不做它应当做的事!”我们举出瓦丁顿引用的经典例子，一个贫民窟清除计划得出了情况比以前更糟的结果。新建筑吸引大批人到此区域，但如果那里没有足够的工作给他们做，他们仍然很穷，他们的住房甚至会变得更加拥挤不堪。我们被训练得用线性因果论的方法去思考，但我们需要新的“思想工具”，模型的最大益处之一正是要帮助我们发现这些工具并学会怎样使用它们。

如我们已经强调指出的，当关键的维是群体数(无论是动物，活动，还是习惯)的增长时，逻辑斯谛方程是最适合的。预先假定的是给定群体中的每个成员都可以看作与其他群体中任一成员等效。但是这个一般的等效性本身并不能被看作是简单的一般事实，而应看作是一种近似，其有效性取决于该群体所承受的约束和压力，以及它用来对付它们的战略。

例如，我们考虑生态学家建议的 K 战略和 r 战略之间的区分。K 和 r 代表逻辑斯谛方程中的参量。虽然这个区分仅是相对的，但当它刻画由两种群体间的系统相互作用特别是猎物-捕食者的相互作用所造成的发散现象的特点时，这个区分特别清楚。用这种看法时，猎

物群体的典型进化是再生率 r 的增大。捕食者将向捕获其猎物的更有效的方式进化，就是说，向着改善 K 的方向进化。但这个在逻辑斯谛框架中定义的改善能够得到超出逻辑斯谛方程所确定的情形的结果。

如斯蒂芬·古尔德*所评论的那样，K 战略的含义是：个体变得越来越能够从经验中学习并把记忆存贮起来，就是说，个体越来越复杂，伴随着越来越长的成熟期和学徒期。这又转而意味着个体一方面变得更“有价值”(代表较大的生物学投资)，另一方面以一个较长的脆弱期为特点。因此，“社会”联系和“家庭”联系的发展就像是 K 战略的逻辑上的配对物。从这一点出发，除了该群体中的个体数目之外，其他因素都变得越来越有关系，而用个体数目来量度结果的逻辑斯谛方程则变得有可能出错。这里我们遇到的是使模型化如此危险的东西的一个特别的例子。在复杂系统中，实体的定义和实体间相互作用的定义都可以通过进化来加以修正。不仅系统的每个态，而且把系统作为模型化的定义本身，一般说来都是不稳定的，或至少是亚稳的。

我们遇到了这样的问题，在那里，方法论不能和被研究对象的本性问题分开。关于苍蝇的一个群体(它们成百万地出生和死亡，没有明显地从它们的经验中学会什么或扩大它们的经验)和关于灵长目动物的一个群体(其中每个个体都是它自己的经验和它所在群体的传统的一个纠结体)，我们不能提出同样的问题。

我们还发现，在人类学本身之内，在各种研究集体现象的方法之间，必须作出基本的选择。例如，众所周知，结构人类学偏爱那些可以用到逻辑工具和有穷数学的社会方面，即诸如亲缘关系的基本结构或神

* 古尔德(Stephen J. Gould，1941—)，美国古生物学家，哈佛大学教授，著名进化论者。——译者

话的解析那样一些方面，其变化常被拿来和晶体的生长作比较。一些离散的元素被计数并被结合起来。这和用涉及大的、部分混乱的群体的过程来分析进化的方法形成对比。我们正在处理两种不同的观点和两类模型：莱维-斯特劳斯(Lévi-Strauss)把它们分别定义为“机械的”和“统计的”。在机械的模型中，“元素具有和现象同样的尺度”，且个体的行为基于与社会的结构组织有关的法规。人类学家使这一行为的逻辑成为显然的。另一方面，社会学家使用大群体的统计模型进行工作，并确定均值和阈值。

完全用功能模型定义的社会相应于亚里士多德关于自然等级和秩序的理想。每个官员行使着他被委任的职责。这些职责在每一级别上转变着整个社会组织的不同方面。国王发命令给建筑师，建筑师命令合同承包者，合同承包者命令工人。到处都有一个谋士在起作用。相反，白蚁或其他的群居昆虫似乎接近于“统计的”模型。如我们已看到的，在白蚁筑窝的背后似乎没有任何谋士，白蚁筑窝时，个体之间的相互作用在某些环境中产生一定类型的集体行为，但这些相互作用中没有一个是与任何全局任务有关的，它们都纯粹是局部性的。这样一种描述必然隐含着平均，必然重新引入稳定性和分叉的问题。

哪些事件将衰退下去，哪些像是会影响整个系统?什么是供选择的局面，什么是稳定性的状态?因为尺寸或系统的密度可能起着分叉参量的作用，纯数量上的增长怎么会导致性质上的新选择?诸如这样的一些问题确实唤起了一个雄心勃勃的计划。就像 r 和 K 战略一样，这些问题引导我们为社会行为和历史选择一个“好”的模型。一个群体的进化怎样使它变得更加“机械的”?这个问题看来是和我们在生物学中已遇到的那些问题相并列的。例如，控制着代谢反应速度及其调节的那些遗传信息的选择怎样偏爱某些路径到如此程度，以至发育似乎是有目的的，

或者这种选择怎样作为一种“信息”的翻译而出现?

我们相信,由“通过涨落达到有序”的概念启发出来的模型将帮助我们讨论这些问题,甚至使我们能在某些情况下对行为的个体和集体方面之间的复杂相互作用给出一个更加精确的表述。从物理学家的观点来看,这涉及两个方面之间的区分:一方面是系统的状态,在这些状态中,所有个体的主动性都必然变得无意义;另一方面是分叉区域,其中一个个体、一种思想或一个新行为能打乱全局状态。即使在这些区域中,仅靠任何个体、思想或行为,放大显然不会发生,只有靠那些“危险”的个体、思想或行为,就是说,靠那些能够为了自己的利益而利用使原先状态的稳定性得到保证的非线性关系的个体、思想或行为,放大才会发生。这样,便引导我们得出结论:同一些非线性可能从基本过程的混沌中产生出秩序,也可能在不同的环境中成为破坏这同一秩序的原因,并最终在另一分叉之外产生新的一致性。

“通过涨落达到有序”的模型引入了一个不稳定的世界,在那里,小的原因可能产生大的效果,但这个世界并非是任意而为的。相反,小事件放大的原因对于合理的研究而言是正当的事情。涨落并不引起系统活动性的改变。显然,利用麦克斯韦提出的想象,火柴会引起森林大火,但只提及一根火柴,还不足以使我们认识这个大火。而且,涨落逃脱控制这样的事实并不意味着我们不能找出涨落放大所引起的不稳定性的原因来。

8 开放的世界

由于这里出现的问题的复杂性,我们很难不说,生物和社会进化的传统解释方法代表了从物理学借来的这些概念和方法的一次特别不幸

的利用。说不幸的原因是，这些概念和方法所适用的物理学的范围是很有限的，因而在它们和社会或经济现象之间所作的类比是完全不恰当的。

这方面的最早的例子是优化范式。显然，人类社会的管理和选择压力的作用一样，倾向于使某些方面的行为或某些方式的联系得到优化。但是，把优化看作是理解群体和个体怎样存活的关键，就会陷入混淆因果的危险。

因此，优化模型既不顾那些彻底变化(它们改变问题的定义，因而改变所求的解的类型)的可能性，也不顾那些惰性的约束(它们可能最终强迫系统进入一种灾难性的功能方式)。像亚当·斯密的不可见的手或用最大或最小判据对进步作出的其他定义等等学说一样，这给出一个重新肯定的表象，把自然看作是一个万能的和合理的计算器，且具有一个以全局进步为特征的连贯的历史。为了同时恢复惰性和未预料事件的可能性，就是说，恢复历史的开放特点，我们必须接受它的基本的不确定性。这里，我们可以使用白垩纪大灭绝的表面上偶然的性质作为一个象征，那次大灭绝为一些哺乳动物(少数几种类似老鼠的动物)的发生扫清了道路。

这是一般的陈述，一种"鸟瞰"，因而省略了许多令人很感兴趣的课题：例如火焰、原生质、激光，都呈现出具有很大理论意义和实践意义的非平衡不稳定性。向各处看去，我们发现的是一个充满多样性和发明创造的自然界。我们所描述过的概念进化的本身镶嵌在一个更为宽广的历史之中，逐渐重新发现时间的历史之中。

我们已经看到，时间的一些新的方面正在逐渐地被纳入物理学，与此同时，经典科学中固有的无所不知的野心正在逐渐被抛弃。在本章中，我们已经从物理学经过生物学和生态学而进入人类社会，但我们也

能以相反的次序来进行。事实上，历史是从主要集中于人类社会开始的，在此之后，注意力落到了生命的时间维和地质学的时间维上。因此，把时间纳入物理学，似乎是把历史逐渐重新插入自然科学和社会科学中去的最后阶段。

奇怪的是，在这过程的每一阶段，这个“历史化”的一个决定性特点总是发现某些时间上的不均匀性。从文艺复兴时代起，西方社会接触过不同的人口，它们被看作是对应于不同的发展阶段；在十九世纪，生物学和地质学学会了发现化石并对其进行分类，学会了在风景中识别与我们共存的对过去的纪念物；最后，在二十世纪，物理学也发现了一种化石，即剩余黑体辐射，它告诉我们有关宇宙诞生的事情。今天我们知道我们生活在这样的一个世界之中，在那里，不同的互锁着的时间和许多过去事物的化石共存着。

现在我们必须转向另一个问题。我们已经说过，生命正开始看上去像“落体一样自然”。自组织的自然过程和一个落体有什么关系呢?在动力学(力和轨道的科学)和复杂性及演化的科学(即生命过程和生命过程所属的自然进化的科学)之间会有什么可能的联系?在十九世纪末，不可逆性与摩擦、粘滞和加热这些现象联系在一起。不可逆性解释了能量损耗和浪费的原因。在当时，还有可能同意这样的一种虚构，即认为不可逆性只是我们愚笨的结果，是我们的不精巧的机器的结果，并且认为自然基本上还是可逆的。现在，这就不再可能了，因为今天就连物理学也告诉我们，不可逆过程起着建设性的和不可缺少的作用。

所以我们遇到了一个不再能够避开的问题。这个复杂性的新科学和简单基本行为的科学之间的关系是什么？关于自然的这两种对立的观点之间的关系是什么?对于一个单一的世界，有两种科学，两种真理吗?这怎么可能呢?

在某种意义上，我们已经回到近代科学的开端。现在，和在牛顿时代一样，两种科学面对面地走到了一起：一种是引力科学，它描述服从规律的非时间性；另一种是火的科学，即化学。现在我们懂得了为什么由科学产生的第一次综合，即牛顿综合，是不可能完善的；动力学所描述的相互作用力无法解释物质的复杂而不可逆的行为。“火改变着物质。”按照这个古老的说法，化学结构是火的创造物，是不可逆过程的结果。我们怎能跨越存在和演化(这是两个处于矛盾中的概念，但这两者又都是达到对我们所在的这个奇怪世界作出一个统一描述所必需的)之间的鸿沟呢?

第三编

从存在到演化

第七章　重新发现时间

1　重点的改变

怀特海写过："几种学说的交锋并不是一场灾难，而是一个好机会。"假如这个论断是对的，那么科学史中如此充满希望的机会是很少的：两个世界(动力学的世界和热力学的世界)面对面地走到一起。

牛顿科学是一种成果，是对几个世纪的实验及理论研究路线集中的登峰造极的综合。对热力学来说同样是如此。科学的成长和科学学科的均匀展开是完全不同的。每个学科本身又分成数目不断增多的一些"滴水不漏"的部分。正好相反，不同问题和观点的集中可能打开这些部分并激励科学的开化。这些转折点具有超出其科学意义并影响整个知识界的结果。反过来，全局性的问题往往是鼓舞科学的源泉。

几种学说的交锋，存在和演化之间的冲突，指出了一个新的转折点已经来临，指出了一种新的综合是必要的。今天，这样的综合正在形成，它的每一点都和先前的综合一样地出人意外。我们又一次发现研究的惊人集中，全部研究都对指出科学理论的牛顿概念中所固有的困难作

出贡献。

牛顿科学的雄心是要提供一个自然图景，该图景将是普适的，决定论的，并且是客观的(因为它不涉及观察者)，完备的(因为它达到摆脱了时间束缚的描述水平)。

我们已经接触到问题的核心。“什么是时间?”我们一定要接受在经典物理学的静态时间和我们在生活中经历的存在时间之间自康德以来已经成为传统的对立吗?按照卡尔纳普(Carnap)的说法：

> 爱因斯坦有一次说过，“现在”的问题使他十分烦恼。他解释道，“现在”的经验意味着某种对人来说是特殊的东西，某种在实质上不同于过去和未来的东西，但是这个重要的差别没有也不可能发生在物理学中。这个经验不能被科学所抓住，这对他来说是一件痛苦而又无法避免的憾事。我认为，一切客观上发生的东西都能在科学中得到描述；一方面，物理学中描述了事件的时间序列；另一方面，人类对于时间的经验的特殊性，包括人类对待过去、现在和未来的不同态度，可以在心理学中得到描述和(原则上的)解释。但爱因斯坦却想，这些科学的描述不可能满足人类的需要；有某些关于“现在”的本质东西刚好是在科学王国之外。

值得注意的是，在遵循一条相反道路的意义上，柏格森同样得出一个二元论的结论(见第三章)。和爱因斯坦一样，柏格森从一个主观的时间开始，然后移到自然的时间，即被物理学所客观化了的时间。但是，在他看来，这个客观化导致了时间的降格。内部的存在时间具有在过程中丢失掉的定性特点。正是由于这一原因，柏格森才引入了在物理时间和

持续(一个与存在时间有关的概念)之间的区别。

但是我们不能停在这里。如弗雷泽(J.T.Fraser)所说的,“感觉的时间和理解的时间之间的最后分歧是科学-工业文明的标志,是一种集体性的精神分裂症。”如我们已经强调过的,在经典科学惯于强调永恒性的地方,我们现在发现了变化和进化;我们再也看不到空中的轨道,这些轨道曾经使康德的心充满着和由于他服膺道德律而充满的同样的赞美之情。我们现在看到一些陌生的客体:类星体,脉冲星,爆炸着且被撕开的星系,以及那样的恒星,据说它们正在坍缩成把所能诱捕到的一切东西不可逆地吞没掉的一些“黑洞”。

时间不仅贯穿到生物学、地质学和社会科学之中,而且贯穿到传统上一直把它排除在外的两个层次,即微观层次和宇观层次之中。不但生命有历史,而且整个宇宙也有一个历史,这一点具有深远的含义。

从广义相对论的观点讨论宇宙模型的第一篇理论性文章是爱因斯坦在 1917 年发表的。它提出了对宇宙的一种静态的、没有时间的看法,即翻译到物理学中的斯宾诺莎看法。但在其后便发生了未曾预料到的事情。很快发现爱因斯坦的宇宙学方程显然还有其他的一些与时间有关的解。我们把这一发现归功于俄国的天体物理学家弗里德曼(A.Friedmann) 和比利时人勒梅特 (G.Lemaître)。在同一时期,哈勃(Hubble)和他的合作者正在研究星系的运动,而且他们证明了远星系的速度与它们到地球的距离成正比。弗里德曼和勒梅特所发现的与膨胀着的宇宙的关系是显然的。但在许多年中,物理学家仍然不愿接受这样一种宇宙进化的“历史”描述。爱因斯坦本人对此很谨慎。勒梅特常说,当他试图和爱因斯坦讨论使宇宙的初态更为精确而且也许在那里能发现宇宙射线的解释的可能性时,爱因斯坦未表示过任何兴趣。

今天,有了新的证据:著名的剩余黑体辐射,即引发高密度火球爆炸的光(我们的宇宙便伴随着这个爆炸而开始)。整个故事好像是对历史的又一次嘲弄。在某种意义上,爱因斯坦违背他自己的意愿,变成了物理学的达尔文。达尔文教导我们,人类是镶嵌在生物进化中的;爱因斯坦教导我们,我们被镶嵌在一个进化着的宇宙之中。爱因斯坦的思想把他引向一个新大陆,这个新大陆对他来说就像美洲对哥伦布那样出乎意料。爱因斯坦和他那一代的许多物理学家一样,受到一个很深的信念的引导,即相信自然中有一个基本的、简单的层次。但在今天,这个层次正在变得越来越不能被实验接近。行为真正"简单"的客体只存在于我们自己的世界中,即在宏观层次上。经典科学小心地从这个中间范围内选择它的对象。被牛顿挑选出来的第一批客体(落体、摆、行星运动)是简单的。但是现在我们知道,这个简单性并不是根本规律的标志:它不能被归属于这世界的其余部分。

这一点够了吗?我们现在知道,稳定性和简单性都是例外情形。我们应不应该因为概念化在实际上仅适用于简单和稳定的对象而对总体主义者所要求于它的总体化置之不理呢?为什么要为动力学和热力学之间的不相容性苦恼呢?

我们不应忘记怀特海的话:学说之间的交锋是一个机会,而不是一场灾难。这段话不断地被科学的历史所肯定。人们常常建议,由于实践上的原因,我们简单地忽略掉某些争端,因为这些争端是基于那些很难实施的理想化的。在本世纪初,一些物理学家建议放弃决定论,因为在现实经验中决定论是不可达到的。事实上,如我们已经强调过的,我们从来不知道一个大系统中的分子的准确位置和速度,因此,对系统未来进化的准确预言是不可能的。再近一些时候,布里渊希望借助于下述常识性的真理而打破决定论,这就是,精确的预言要求关于初始条件的精

确知识，而要得到这一知识就必须付出代价。使决定论奏效所必需的精确预言要求付出“无限的”代价。

这些反对意见尽管是有理由的，但却没有影响动力学的概念世界。它们没有对现实作出新的解释。而且，技术上的进步能使我们越来越接近经典力学所隐含的理想化。

与此相反，对“不可能性”的证明具有基本的重要性。这些证明隐含着发现现实的一种出乎意料的内在结构，这种结构注定使知识界的伟业走向失败。这样的发现将排除一种操作的可能性，这种操作在以前可能被想象为至少在原则上是可行的。“任何机器都不可能具有大于一的效率”，“任何热机如不接触两个热源，都不可能作出有用功”，这些就是陈述不可能性的例子，它们已经引出了意义深远的概念的创新。

热力学、相对论和量子力学，都起源于发现了不可能性，发现了经典物理学的雄心的局限性。因此它们标志出一种已到达其极限的探索的终止。但是我们现在在一种不同的光线下，可以把这些科学发明看作不是终止而是开始，是一些新机会的开辟。我们将在第九章中看到，热力学第二定律甚至在微观层次上表达了一种“不可能性”，但是即使在那里，新发现的不可能性也成为使新概念出现的新的起点。

2 普适性的完结

科学描述必须和某个属于他所描述的世界的观察者可以利用的资源相一致，而不能涉及“从外部”来看这个物理世界的人。这是相对论的基本要求之一。讲到信号的传播时，出现了一个任何观察者都不可能越过的极限。实际上，真空中的光速 c (c =300000 公里 / 秒)就是一切信号传播的极限速度。因此，这个极限速度起着根本的作用。它限制着空间

中可能影响观察者所处位置的区域。

在牛顿物理学中没有任何普适常数。这就是它主张普适性的原因，就是它为什么能不管对象的尺度如何而以同一方式被应用的原因：原子、行星和恒星的运动都服从一个定律。

普适常数的发现标志着一个根本的变化。把光速用作比较的标准，物理学建立起了低速和接近光速的高速之间的区别。

与此类似，普朗克常数 h 按照对象的质量建立起一个自然的尺度。原子不再能被看作是一个小型的行星系统。电子属于一种和行星及其他一切重的、慢运动的宏观客体(包括我们自己)不同的尺度。

普适常数不但通过引入物理尺度(据此，各种行为都成为性质上有区别的)破坏了宇宙的均匀性，而且引出了客观性的一种新概念。任何观察者都不能以高于真空中光速的速度来发射信号。由此得出爱因斯坦的著名结论：我们不再能够定义两个远离事件的绝对同时性，同时性只能用一个给定的参照框架来定义。本书的范围不允许对相对论作更多的说明。让我们仅指出，牛顿定律并不假定观察者是一个“物理存在”。客观描述被精确地定义成对其作者没有任何涉及。对于能以无限速度通信的“非物理的”智能存在物而言，相对性的定律就是无意义的了。相对性是基于一种约束之上的，这约束只适用于物理上局域化的观察者，适用于在某一时刻只能处于一个位置而不可能同时处于各处的那些人。这个事实赋予这个物理学以一个“人类的”性质。但是这并非意味着它是一种“主观”物理学，是我们的偏爱和信念的结果；它仍然服从那些把我们认作是我们所描述的物理世界的一部分的内在约束。这是一种预先假定了一个位于被观察世界之内的观察者的物理学。我们和自然的对话仅当它是来自自然之内时才会成功。

3 量子力学的起源

相对论改变了客观性的经典概念。但是,它留下了经典物理学的另一个基本特征没有改变,就是要得出对自然的一个"完备"描述的雄心。在相对论以后,物理学家再也不能求助于某个从外部观察整个世界的小妖,但是他们仍可想象出一个最高的数学家,他像爱因斯坦主张的那样,既不骗人,也不掷骰子。这个数学家会占有宇宙的公式,这公式包括对自然的一个完备的描述。在这个意义上,相对论仍然是经典物理学的一个继续。

另一方面,量子力学的确是与过去决裂的第一个物理理论。量子力学不仅使我们位于自然之中,它还把我们标记为由宏观数目的原子组成的"重的"存在物。为了使作为普适常数的光速的结果能被看得更为清楚,爱因斯坦想象他自己骑着一个光子。但量子力学发现,我们太重了,以致无法骑光子或电子。我们不可能代替如此轻的存在物,把我们自己和它们等同起来,并描述它们会想些什么(假如它们能思考的话)以及它们会经历些什么(假如它们能够感觉什么东西的话)。

量子力学的历史,如同一切概念创造的历史一样,是复杂的,充满未曾料到的事件;它是一种逻辑的历史,这种逻辑早在它的蕴含被发现之前很久就在实验的紧迫中和在某种困难的政治和文化的环境中被想象过。这个历史不能在此叙述,我们只想强调它在建设从存在到演化的桥梁(这是我们的主题)中所起的作用。

量子力学的诞生本身是对这座桥梁的探索的一部分。普朗克曾对物质和辐射之间的相互作用很有兴趣。他的工作基于这样的雄心:要在物质与光的相互作用方面完成玻耳兹曼在物质与物质的相互作用方面

所完成的工作，即要为导致平衡态的不可逆过程发现出一个动力模型。使他感到吃惊的是，为了达到在热平衡态有效的实验结果，他被迫假定在物质和辐射之间的能量交换只能发生在包含一个新普适常数的若干离散步中。这个普适常数“h”量度每一步的“尺寸”。

在这个例子中，和在其他许多情形一样，不可逆性的挑战引出了在物理学中的有决定意义的进步。

这一发现一直是孤立的，直到爱因斯坦对普朗克常数作出第一个一般解释。他懂得，该常数对于光的本性具有深远的蕴含。他引进一个革命的概念：光的波粒二象性。

自十九世纪初起，人们把光和在诸如衍射和干涉这些现象中表现出的波动性联系起来。但是，在十九世纪末，新的现象被发现，著名的是光电效应——这就是由于光的吸收而排出电子。这些新的实验结果很难用传统的光的波动性来解释。爱因斯坦假定光可以同时是波和粒子，并假定这两个方面通过普朗克常数而关联起来，由此而解决了这个谜。说得更精确一些，一束光波以其频率 ν 及其波长 λ 为特征；h 使我们能从频率和波长走向能量 ε 和动量 p 这样的力学量。一方面是 ν 和 λ，另一方面是 ε 和 p，这两者之间的关系是很简单的：$\varepsilon=h\nu, p=h/\lambda$，两式都含有 h。二十年后，路易斯·德布罗意把这个波粒二象性从光推广到物质，因此成为量子力学的近代表述的起点。

1913 年，尼尔斯·玻尔把新的量子物理学和原子结构(后来与分子结构)连接起来。作为波粒二象性的结果，他证明了存在着电子轨道的离散序列。当一个原子被激发时，电子从一个轨道跃迁到另一轨道。就在这一瞬间，原子释放或吸收一个光子，其频率相当于电子分别在这两个轨道上运动时所具有的能量之差。这个能量差就是用爱因斯坦的把能量和频率联系起来的公式计算出来的。

这样，我们来到有决定意义的1925至1927年，即物理学的一个“黄金时代”。在这个很短的时期中，海森堡、玻恩、约当、薛定谔和狄拉克把量子物理学变成一个和谐的新理论。这个理论把爱因斯坦的和德布罗意的波粒二象性纳入了动力学的一个新的一般化形式（即量子力学)的框架之中。对我们这里的目的而言，量子力学的概念新奇性是本质上的。

首先，必须引进一个在经典物理学中未知的新表述，以容许“量子化”被纳入理论语言之中。基本事实是，原子只能在对应于不同电子轨道的离散能级中被找到。特别是，这就意味着能量(或哈密顿量)不再能只是位置和动量的一个函数，如它在经典力学中那样。否则，给出位置和动量的稍稍不同的值，能量就可能成为种种连续的值。但如观测所揭露的，只有离散的能级存在着。

因此，我们必须用新的什么东西去代替常规的思想，即哈密顿量是位置和动量的函数的思想。量子力学的基本思想是，哈密顿量以及经典力学的其他量，如坐标 q 或动量 p，现在都变成了算符。这是在科学中所曾引入的最大胆的思想之一，我们愿意详细地讨论一下。

这是一个简单的思想，即使初看上去有些抽象。我们必须分清算符(一种数学运算)和它所作用的对象(一个函数)。作为一个例子，我们把用 d/dx 表示的导数作为数学的“算符”，并且假定它作用于一个函数，比如说 x^2。这一运算的结果是一个新的函数，在此例中便是“$2x$”。但是，某些函数在求取导数时有一种特殊的性质。例如，“e^{3x}”的导数是“$3e^{3x}$”：这里我们回到了原来的函数，只是乘上了一个数——此处是3。在一给定算符作用后只是复原的函数，称做这个算符的“本征函数”，算符作用之后将本征函数乘上的数就是该算符的“本征值”。

因此，对每个算符，都有一个集合，一个数值“库”与之对应，这个集

合形成它的“谱”。当本征值组成一个离散数列时，这个谱是“离散”的。例如，存在着一个以所有整数 0，1，2，……为本征值的算符。谱也可以是连续的——例如，当它由 0 和 1 之间的所有的数组成时。

量子力学的基本概念因而可以表述如下：经典力学中的所有物理量都有量子力学中的某个算符与之对应，这个物理量所能取的数值就是该算符的本征值。重要的是，物理量(由某算符表示)的概念现在和它的数量(由该算符的本征值表示)的概念区分开来。特别是，能量现在是由哈密顿算符表示，能级——能量的观测值将由与该算符对应的本征值来标明。

算符的引入为物理学打开了一个令人坚信是丰富的世界，而且我们抱憾的是不能把更多的篇幅用于这一迷人的主题，在其中创造性的想象和实验观察是如此成功地结合在一起。这里我们只想着重指出，微观世界服从于具有新结构的定律，由此一劳永逸地结束了发现一个对所有描述层次都适用的单一概念模式的希望。

专门处理某一情况的新的数学语言的确可能打开一些令人吃惊的研究领域，远远超出这种语言的创造者的期望。这一点也适用于微积分，它是经典动力学表述的根源。它还适用于算符计算法。量子论开始时是一些未料到的实验发现的结果所要求的，很快便揭露出它自身孕育着新的内容。

今天，在算符被引进量子力学的五十多年以后，它们的意义仍然是一个引起热烈讨论的题目。按照历史的观点，算符的引入是和能级的存在连在一起的，但是今天算符甚至在经典物理学中也已有了应用。这说明，算符的意义已被推广到超出了量子力学奠基人的期望。现在，只要由于这种或那种原因而不得不放弃动力学轨道的概念和轨道所隐含的决定论的描述，算符就会出来起作用。

4　海森堡的测不准关系

我们已经看到，在量子力学中，每个物理量都和一个作用于某些函数的算符相对应。和所考虑的算符相对应的本征函数和本征值具有特别重要的意义。本征值精确地对应着物理量现在所能取的数值。让我们更仔细地看一下量子力学中与坐标 q 和动量 p 相联系的算符，我们在第二章中已经看到，它们的坐标是正则变量。

在经典力学中，坐标和动量在下述意义上是独立的；我们可以为某个坐标赋予一个数值，这个值和我们已为动量所赋予的值完全无关。但是，普朗克常数 h 的存在暗示着独立变量数目的减少。我们可以直接从爱因斯坦-德布罗意关系 $\lambda=h/p$ 猜想到这一点，我们已经看到，该关系把波长和动量联系起来。普朗克常数 h 表达了长度（和坐标的概念紧密相关）和动量之间的一种关系。因此，位置和动量不再像在经典力学中那样是独立的变量。与位置和动量相对应的算符可以单独用坐标来表达，或是用动量来表达，这些在所有讨论量子力学的教科书中都有解释。

重要的是，在所有情形中，只有一种量出现(或是坐标，或是动量)，而不是同时出现两种。在这个意义上我们可以说，量子力学把经典力学变量的数目用 2 除了。

在量子力学中，从算符间的关系导出一个基本性质：两个算符 q_{op} 和 p_{op} 不能对易，就是说，$q_{op}p_{op}$ 和 $p_{op}q_{op}$ 施加在同一函数上，其结果是不同的。这一点具有深刻的含义，因为只有对易的算符才允许有共同的本征函数。所以我们不可能找出一个函数，既是坐标的又是动量的本征函数。作为量子力学中坐标算符和动量算符的定义的结果，不可能有这样的状态，其中坐标 q 和动量 p 这两个物理量同时具有完全确定的值。这

种在经典力学中不曾有过的情形是由海森堡的著名的测不准关系表达出的。我们可以测量坐标和动量，但用 Δq，Δp 表示的各自可能预言的差量，被海森堡不等式 $\Delta q \Delta p \geq h$ 联系起来。我们可以使 Δq 任意小，但那时 Δp 就变成无穷大，反过来也一样。

有关海森堡的测不准关系已有很多论述，我们的讨论显然是过于简化了的。但是我们希望读者了解一下由于使用算符而出现的新问题：海森堡测不准关系必然引起因果概念的修正。精确地确定坐标是可能的。但当我们这样做的那个瞬间，动量将得到一个任意值，或正或负。换句话说，客体的位置一下子将变得任意远。局域化的意义变得模糊了：构成经典力学基础的那些概念被深刻地改变了。

量子力学的这些结果是许多物理学家包括爱因斯坦所不能接受的；他们设计出许多实验来证明上述结果的荒唐。还有一种企图，要使所涉及的概念变革成为最小。特别是，人们设想，量子力学的建立以某种方式和由观测过程产生的扰动联系起来。一个系统被认为具有一些固有地完全确定的力学参量，比如坐标和动量；但它们当中的某些参量可能被测量弄得模糊起来，而海森堡的测不准关系只是表达出测量过程所产生的扰动。因此，经典的现实主义在基本层次上仍保持原样，我们只是不得不加上一个实证主义的修饰语。这种解释看来太狭窄了。干扰结果的并不是量子测量过程。远不是如此，普朗克常数强迫我们修正我们的坐标和动量的概念。这个结论已被最近的实验所证实，这些实验是用来检验对那些为了恢复经典决定论而引入的局域隐变量所作的假定的。这些实验的结果证实了量子力学的一些引人注目的结果。

量子力学迫使我们不大能绝对地谈及某客体的局域化，这一点如尼尔斯·玻尔时常强调的，暗示我们必须放弃经典物理学的现实主义。

在玻尔看来，普朗克常数把在一个量子系统和测量装置之间的相互作用定义为不可分开的。只是对量子现象的整体，包括测量相互作用，我们才能赋予数值。因此，全部描述意味着一种对测量装置的选择，一种对所提问题的选择。在这个意义上，答案，即测量结果，并不能使我们接近某个给定的实在。我们必须决定我们将要实行哪个测量，以及我们的实验将向系统提出哪个问题。因此对一个系统来说，有不可约化的表象的多重性，每一个表象联系着一个确定的算符集。

这说明和客观性的经典观念的分歧，因为在经典观点中，仅有的“客观”描述是照系统原样对系统进行完整描述，而和怎样观察它的选择无关。

玻尔总是强调通过测量所引入的正的选择的新奇性。物理学家必须选择他的语言，选择宏观实验设置。玻尔通过互补性原理表达出这种思想，互补性原理可以看作是海森堡测不准关系的一个推广。我们能测量坐标或动量，但不能同时测量这两者。没有一种理论语言(它把可以赋予确定值的变量清晰地表达出来) 能把一个系统的物理内容表达无遗。各种可能的语言和对系统的各种可能的观点可以是互补的。它们都处理同一实在，但不能把它们约化为一种单一的描述。对同一实在的观点的不可约化的多样性表达出可以看到整个实在的一种神明观点的不可能性。但是互补性原理的教训不是无可奈何的教训。玻尔常说，量子力学的意义总使他感到眼花缭乱，而且当我们离开常识的舒适成规时，我们的确感到了眼花缭乱。

要从互补性原理学到的真正教训，一种也许能够转移到其他知识领域的教训，在于强调现实的丰富，它超过了任何单一的语言，任何单一的逻辑结构。每一种语言所能表达的只是实在的一部分。例如，音乐的任何一种实现，任何一种作曲风格，从巴赫到勋柏格，都没有穷

尽音乐。

我们强调了算符的重要性，因为它们表明，物理学所研究的实在也是一种精神结构，它不仅仅是被给出的。我们必须区分在数学上用算符表示的坐标或动量的抽象概念和能够通过实验得出的它们的数值实现。“两种文化”互相对立的原因之一可能就是相信文学对应着实在的概念化，对应着“虚构”，而科学似乎是要表达客观的“实在”。量子力学使我们懂得，情况并非如此简单。在所有层次上，现实都隐含着一个基本的概念化要素。

5　量子系统的时间演变

现在我们来讨论量子系统的时间演变。像在经典力学中一样，哈密顿量起着根本的作用。我们看到，在量子力学中，它被哈密顿算符 H_{op} 所代替。这个能量算符起着中心的作用：一方面，它的本征值和能级相对应；另一方面，如在经典力学中一样，哈密顿算符决定了系统随时间的演变。在量子力学中，经典力学的正则方程所起的作用由薛定谔方程承担，薛定谔方程表达了这样一个函数随时间的演变，该函数把量子状态的特征归结为在波函数 ψ 上施加算符 H_{op} 所得到的结果(当然，还有其他的表述，我们不能在此描述)。选择“波函数”这样一个词是为了再一次强调在全部量子物理学中是如此根本的波粒二象性。ψ 是波幅，它随着哈密顿量所确定的方程的粒子类型而演变。薛定谔方程像经典物理学的正则方程一样，表达出一种可逆的和决定论的演变。波函数的可逆变化对应于一个沿着某个轨道的可逆运动。如果知道了在给定时刻的波函数，那么薛定谔方程就使我们能计算出任何较前时刻或较后时刻的波函数。按照这个观点，情况严格地类似于经典力学。这是因为量子力学的测不准关系没有包括时间。时间仍然是一个数，不是一个算符，而

只有算符才能出现在海森堡测不准关系中。

量子力学只处理经典力学变量的一半。因此,经典的决定论成为不可应用的,且在量子物理学中统计的思想起着中心的作用。我们是通过波强度 ψ^2(波幅的平方)接触统计思想的。

量子力学的标准统计解释如下:考虑某个算符比如说能量算符 H_{op} 的本征函数及其相应的本征值。一般地说,波函数 ψ 将不是能量算符的本征函数,但它可以被表达成这些本征函数的叠加。每个本征函数在这个叠加中各自的重要性使我们能够计算出各种可能的对应本征值出现的概率。

这里我们又一次注意到与经典理论的一个基本分歧。可以预言的只是概率,而不是单个事件。这是在科学史上第二次使用概率去解释自然的某些基本性质。第一次是玻耳兹曼对熵的解释。但是,在那里,一种主观的观点仍是可能的,在这种观点中,"只是"由于我们面对所研究的系统的复杂性时的无知,才使我们无法得到一个完备的描述。(我们将看到,在今天,有可能克服这种态度。)这里,和以前一样,概率的使用是许多物理学家包括爱因斯坦所不能接受的,因为他们希望得到一种"完备"的决定论的描述。正如对待不可逆性那样,乞求于我们的无知看来提供了一条出路:我们的笨拙使我们要对量子世界中的统计行为负责,正如它使我们对不可逆性负责一样。

我们又一次遇到隐变量的问题。但是,如我们已说过的,还不曾有实验证据说明引进这种变量是正当的,而且概率的作用看来是不可减少的。

薛定谔方程导出决定论预言的情形只有一种:这就是当 ψ 不作为本征函数的叠加而被约化为一个单一的本征函数时。特别是,在一个理想的测量过程中,一个系统可以被准备得使某一给定测量的结果可以

预言。于是我们知道，这系统是被相应的本征函数所描述的。从这时起，系统可以被肯定地描述成是处于由测量结果所指明的本征态之中。

量子力学中的测量过程具有特殊的意义，这种意义在今天正吸引着极大的兴趣。假定我们从某个确实是本征函数的叠加的波函数出发。作为测量过程的结果，全由这同一个波函数表示的所有系统的单一的集合将被对应于各个可能被测出的本征值的波函数的集合所代替。用技术性的话来说，测量把单一的波函数(一种"纯粹"态)转为一种混合态。

如玻尔和罗森菲尔德(Rosenfeld)反复指出的那样，每个测量都包含着一个不可逆性要素，一种对不可逆现象(如和"数据"记录相对应的化学过程)的求助。记录伴随着一个放大，由此，微观事件产生出宏观层次上的效果，这宏观层次就是我们可以读测量仪表的层次。因此，测量预先假定了不可逆性。

从某种意义上说，在经典物理学中就已经如此。但是，测量的不可逆性问题在量子力学中更为急切，因为它在自身表述的层次上提出了问题。

按照通常解决这一问题的方法，量子力学没有进行选择，而是假定两种彼此不可约化的过程的共存，这两种过程就是薛定谔方程所描述的可逆和连续的演变，和在测量时波函数不可逆和不连续地约化为它的本征函数之一。于是得到这样的佯谬：可逆的薛定谔方程只能由不可逆的测量去检验，而按照定义，这个可逆的方程却不能描述这些不可逆的测量。因此，量子力学不可能建立起封闭的结构。

面对这些困难，一些物理学家再一次躲避到主观主义里，他们说，我们(我们的测量，有些人甚至说，我们的思想)决定着打破自然的"客观"可逆性的法则的那个系统的演变。另一些物理学家得出结论说，薛

定谔的方程是不“完备”的,必须增加新的项,以说明测量的不可逆性。其他更加不可能的“解”也被提出过,例如埃弗雷特(Everett)的多世界假设。但是在我们看来,量子力学中可逆性和不可逆性的共存表明,把动力学世界描述成是自洽的那种经典的理想化在微观层次是不可能的。这就是玻尔所说的我们用来描述量子系统的语言不能和描述我们测量仪表的功能的宏观概念分开这段话的含义。薛定谔方程所描述的并不是现实的一个孤立的层次,倒是它预先假定了我们所属的这个宏观世界。

因此,量子力学中的测量问题是本书致力讨论的问题之一的一个方面——哈密顿轨道和薛定谔方程所描述的简单世界和不可逆过程的复杂宏观世界之间的联系。

在第九章中我们将看到,当包含在轨道概念中的理想化变为不适当的时候,不可逆性进入了经典物理学。量子力学中的测量问题容许得到同一类型的解。事实上,波函数表示对某个量子系统的最大知识。如在经典物理学中那样,这个最大知识的对象满足一个可逆的变化方程。在这两种情形中,不可逆性都是当和最大知识相对应的理想客体不得不被较少理想化的概念代替时引进的。但这在何时发生?这是个我们将在第九章讨论的不可逆性的物理机制的问题。但是,让我们先概括一下当代科学更新的某些其他特点。

6 非平衡宇宙

本章中所描述的这两次科学革命,是作为把普适常数(c 和 h)纳入经典力学的框架中去的企图而开始的。这导致影响深远的后果,其中有一些我们已在这里描述。从其他的角度来看,相对论和量子力学似乎坚持在牛顿力学中所表达的基本世界观。对时间的作用和意义而言,尤其

如此。在量子力学中，只要知道了在时刻 0 时的波函数，那么它在未来和过去的值 $\psi(t)$便都是确定的。与此类似，在相对论中，常常使用四维记法(空间三维和时间一维)来强调时间的静态几何性质。如闵可夫斯基在 1908 年简洁地表达的，“空间本身和时间本身都注定消失在不过是阴影之中，只有这两者的某种联合才能保持某种独立的现实性……只有在自身中的世界才能存在下去。”

但在过去的五十年间，这种情况已发生根本的变化。量子力学已经成为处理基本粒子及其变换的主要工具。描述在过去几年中出现的惊人多样的基本粒子已超出本书的范围。

我们只想回顾，狄拉克使用量子力学和相对论这两者证明了，我们必须把每一个具有质量 m 和电荷 e 的粒子和具有同一质量和相反电荷的某个反粒子联系起来。正电子，即电子的反粒子，以及反质子，都正在高能加速器中产生出来。反物质已经成为粒子物理学中的普通研究课题。粒子和与之对应的反粒子在碰撞时彼此湮灭，产生出光子，即和光相应的没有质量的粒子。量子论的方程对于粒子与反粒子的交换而言是对称的，或者说得更确切一些，它们对于一种称为 CPT 对称的较弱的要求而言是对称的。尽管有这种对称性，但是在我们周围世界中存在着粒子与反粒子之间的一种引人注意的非对称性。我们是由粒子(电子、质子)组成的，而反粒子只是罕见的实验室产品。假如粒子和反粒子以相等的数量共存，那么一切物质将被湮灭。强有力的证据证明，我们的星系中不存在反物质，但并不能排除在远星系中存在的可能性。我们可以想象宇宙中的一种机制，它把粒子和反粒子隔开，把反粒子藏到了什么地方。但是，似乎更可能的是，我们生活在一个“非对称的”宇宙中，在那里，物质完全地统治着反物质。

这怎么可能呢?萨哈罗夫(Sakharov)在 1966 年提出了一个解释这

一情形的模型，而今天，很多工作正沿着这些路线在进行着。该模型的一个基本要素是，在物质形成的时刻，宇宙必须处于非平衡条件下，因为在平衡态，第五章讨论过的质量作用定律会要求有等量的物质和反物质。

我们想在这里强调的是，非平衡态现在得到了一个新的宇宙学的维。没有非平衡态和没有与之相连的不可逆过程，宇宙就会有完全不同的结构。那里就不会有明显数量的物质，只有一些物质局部超过反物质，或反物质局部超过物质的涨落现象。

量子论已经从一种机械论的理论（它被修正得去说明普适常数 h 的存在）演变成一种基本粒子相互变换的理论。在想表述"基本粒子统一理论"的最近尝试中，人们甚至猜想，物质的所有粒子，包括质子，都是不稳定的（不过，质子的寿命会非常长，具有 10^{30} 年的数量级）。力学，即运动的科学，并不对应于描述的基本层次，而变成只不过是一种近似，它之所以有用，只是因为像质子那样的基本粒子具有很长的寿命。

相对论已经经受了同样的变革。如我们已提到的，它是作为一种十分强调无时间的特点的几何理论而开始的。今天，它是研究宇宙热史的主要工具，是为导出现今宇宙结构的机制提供线索的主要工具。时间的问题，不可逆性的问题，因而得到了新的急迫性。它已从工程的领域，从应用化学的领域（它首先在那里被表述），扩展到了整个物理学，从基本粒子到宇宙学。

从本书的角度来看，量子力学的重要性在于它把概率引入了微观物理学。不应把这一点和描述第五章讨论过的化学反应的随机过程混淆起来。在量子力学中，除了测量过程之外，波函数是以决定论的形式变化的。

我们看到，在从量子力学被表述以来的五十年中，非平衡过程的研

究已经揭露出，涨落和随机因素甚至在微观尺度上也是重要的。我们在本书中已反复指出，今天正在进行的物理的重新概念化，从决定论的可逆过程转向随机的不可逆的过程。我们相信，量子力学在这个过程中占有一种中间的位置。在那里，出现了概率，但没有出现不可逆性。我们期望(而且我们将在第九章中给出这种期望的某些理由)，下一步将是引进微观层次的基本不可逆性。和企图通过隐变量或其他手段去恢复经典正统性的那种思想相反，我们将坚决主张，必须进一步远离对自然的决定论的描述，并采用一种统计的随机描述。

第八章 学说间的交锋

1 概率和不可逆性

我们将看到，物理学家在几乎所有的地方都把单向时间的使用排除在他们的科学之外，他们好像知道这种思想和物理学的思想不同，引入了一种拟人论的因素。尽管如此，在某些重要的场合曾经求助于单方向的时间和单方向的因果性，不过，正如我们将要说明的那样，它们总是在支持某种错误的学说。

刘易斯(G.N.Lewis)

我认为，熵永远增加的定律(即热力学第二定律)在自然定律中占有至高无上的地位。假如有人向你指出，你的得意的宇宙理论与麦克斯韦方程不一致，那么对麦克斯韦方程而言，更坏的事情也不过如此。假如你的理论被发现是与观测相矛盾的，那好，这些实验家有时候

会做出一些错事。但是，如果发现你的理论与热力学第二定律相对立，那我不能给你任何希望；它只有彻底垮台，别无出路。

A.S.爱丁顿

随着热力学第二定律的克劳修斯表述，热力学与动力学之间的冲突变得显而易见。在物理学中几乎没有一个问题比热力学与动力学之间的关系问题更经常和更活跃地被讨论过。即使在现在，在克劳修斯之后一百五十年，这个问题依然激起强烈的反响。没有一个人能在这个冲突中保持中立，这个冲突涉及现实和时间的含义。一定要放弃动力学这个近代科学之母而垂爱于某种形式的热力学吗?这是“唯能论者”的观点，他们曾在十九世纪有过很大影响。有没有一种办法去“救助”动力学，去重新获得第二定律而不放弃由牛顿及其继承者所建立起来的可怕的结构呢?在一个由动力学所描述的世界里，熵能起什么作用呢?

我们已经提到过玻耳兹曼提出的答案。玻耳兹曼的著名方程$S=k\log P$建立了熵与概率之间的关系：熵随着概率的增大而增大。让我们立刻强调指出，从这个角度来看，第二定律具有实践上很大的重要性，但却没有什么根本性的意义。马丁·加德纳在他的杰作《灵巧的宇宙》一书中写道：“某些事件只走一条路，并非因为它们不能走另一条路，而是因为它们绝对不可能倒退回去。”通过改善我们测量越来越不可能的事件的能力，我们就能达到使第二定律的作用任意小的情形。这是今天经常采取的观点，但这不是普朗克的观点。普朗克认为：

假定第二定律的有效性总是和进行观察或实验的物理学家或化学家的技巧有关，这是荒唐的。第二定律的要旨与实

验毫无关系。该定律简要地断言：自然界中存在着一种量，在一切自然过程中，这种量总是在同样的意义上变化。以这种一般形式陈述的命题可能是正确的，也可能是不正确的，但无论是对是错，它将保持其对或错，而不管在地球上是否存在着能够思想和能够测量的人，也不管他们(假定他们存在的话)是否能够比我们能做的更精确一位、两位或一百位小数地去测量物理过程或化学过程的细节。这个定律如果有什么局限性的话，那也肯定是在它的基本思想所在的同一地方，在这个被观察到的自然之中，而不是在观察者那里。在推演这个定律时求助于人的经验是无关紧要的，因为在实际上那是我们得到有关自然定律的知识的惟一途径。

可是，普朗克的观点仍是孤立的。正如我们注意到的，大多数科学家认为第二定律是一种近似的结果，是主观观点对物理学精确世界的入侵。例如，玻恩说过一句名言："不可逆性是把无知引入物理学基本定律的结果。"

在本章中，我们希望讨论一下发展第二定律的解释的一些基本阶段。首先我们必须理解为什么这个问题显得那样困难。在第九章中，我们将继续提出一种新的方法，我们希望它将清楚地表达出第二定律的基本根源和客观意义。我们的结论将与普朗克的观点一致。我们要说明，第二定律决不是要破坏动力学那种令人生畏的结构，而是要在它里面增添一个带根本性的新要素。

首先我们想阐明玻耳兹曼关于熵与概率之间的联系。先来讨论一下埃伦费斯特夫妇(P. and T. Ehrenfest)提出的"罐子模型"。考虑有 N 个客体(例如球)分布在两个容器 A 和 B 中。每隔一定的时间(例如每秒)，

随意地选择一个球，并把它从一个容器移到另一容器。设在 n 时刻有 k 个球在 A 中，有 $N-k$ 个球在 B 中。那么在 $n+1$ 时刻，A 容器中可能有 $k-1$ 或 $k+1$ 个球(参阅图 24)。我们得出，由 k 变为 $k-1$ 的转移概率是 k/N，由 k 变为 $k+1$ 的转移概率是 $1-k/N$。假定这个实验继续进行下去。我们期望，交换球的结果是达到玻耳兹曼意义下的最可几分布。当球的个数 N 很大时，这个分布对应着每个罐中有 $N/2$ 个球。这一点可以通过初等计算或做实验来加以验证(参阅图 25)。

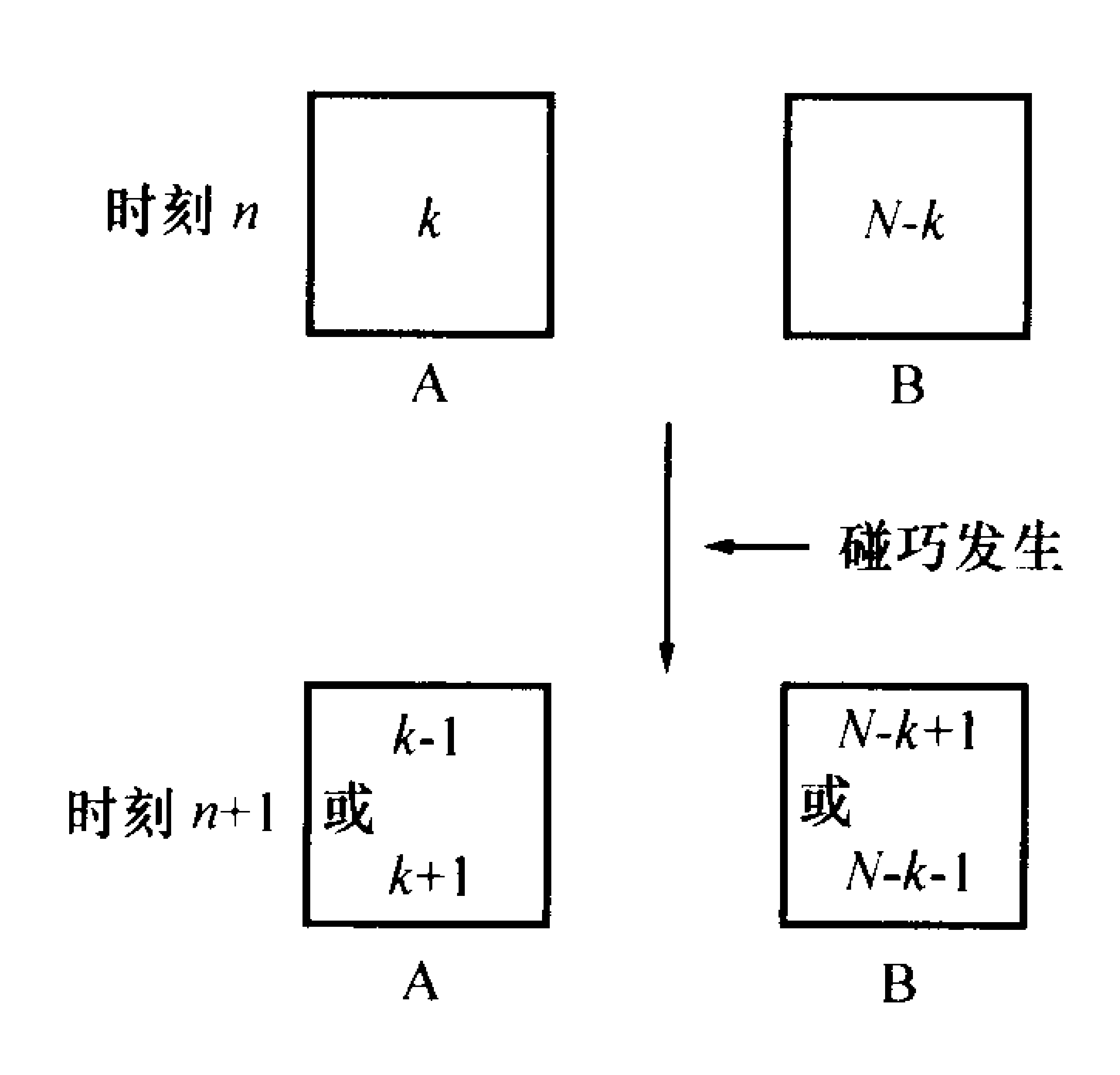


图 24 埃伦费斯特的罐子模型

N 个球分布在 A 和 B 两个容器中。在时刻 n，有 k 个球在 A 中，$N-k$ 个球在 B 中。每隔一定时间有一个球随机地从罐 A 取出并放入罐 B。

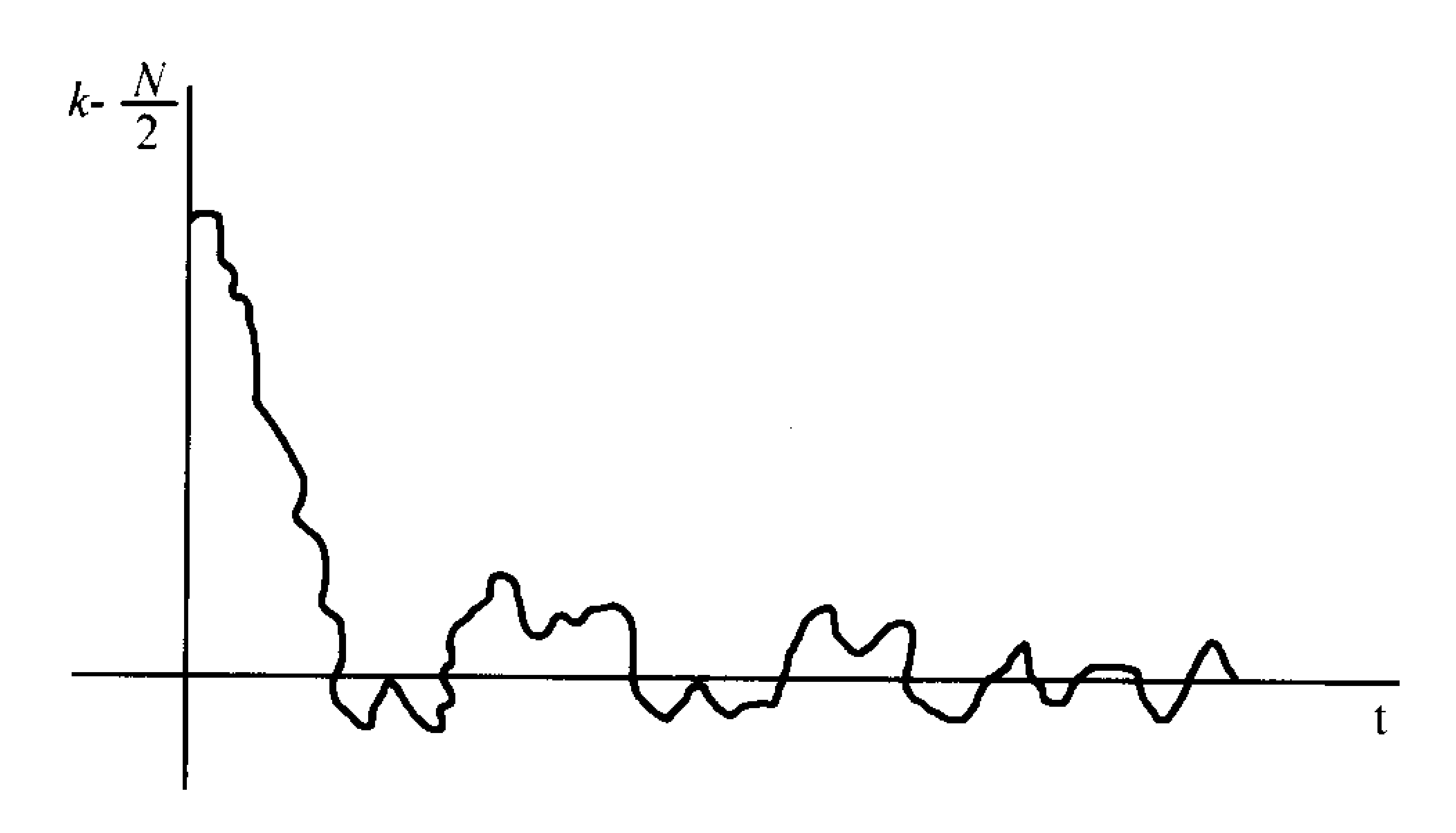


图 25 埃伦费斯特罐子模型中向平衡态($k=N/2$)的趋近(示意图)

埃伦费斯特模型是“马尔可夫过程”(或称马尔可夫“链”)的一个简单例子,这个过程因伟大的俄国数学家马尔可夫而得名,他是最早论述这种过程的人之一(另一位是彭加勒)。简要地说,这种过程的特点就是存在着确定的转移概率,与系统先前的历史无关。

马尔可夫链有一个显著特点:它们能用熵来加以描述。让我们把在容器 A 中找到 k 个球的概率叫做 $P(k)$,于是,我们把它和一个“$\mathscr{H}$量”联系起来,这个量正好具有我们在第四章中讨论过的熵的特性。图 26 给出了它的演变的一个例子。$\mathscr{H}$量随时间均匀地变化,如同一个孤立系统的熵的变化一样。确实,$\mathscr{H}$量随时间减小,而熵 S 随时间增大。不过,这是个定义上的问题:$\mathscr{H}$起着$-S$的作用。

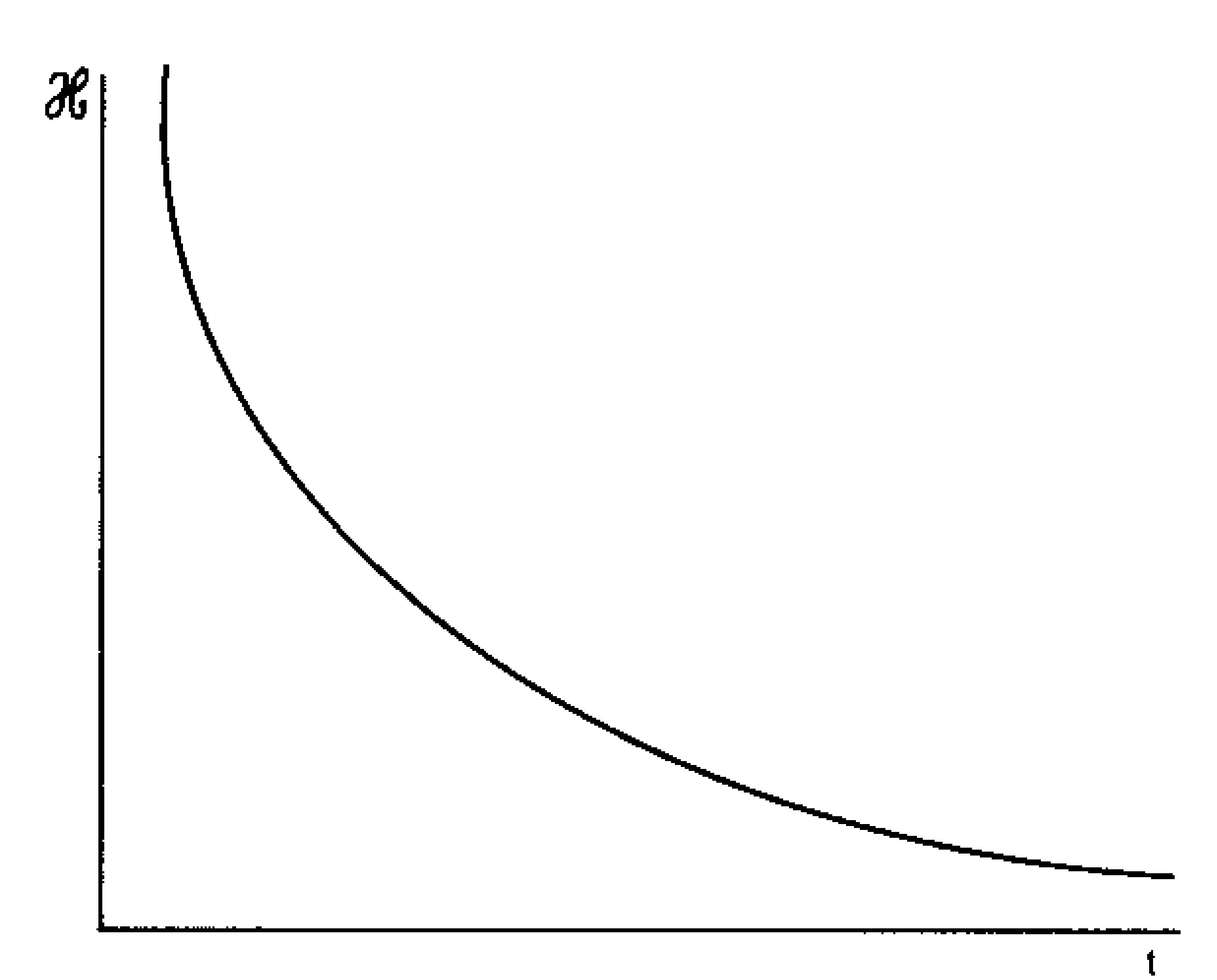


图 26 和埃伦费斯特模型对应的$\mathscr{H}$量(定义见正文)随时间的演变

该量单调地减小,当时间很长时趋于零。

这个“$\mathscr{H}$量”的数学含义值得更详细地加以考虑:它给出了在一给定时刻的概率和在平衡态(每个罐里的球数为 $N/2$)时存在的概率之差。埃伦费斯特罐子模型中所用的论断可以被推广到一般。我们来考虑正方形分划问题——就是说,把正方形逐步细分成一些不连接的区域。然后我们考虑正方形中粒子的分布,并把在区域 k 中找到一个粒子的概率称作 $P(k,t)$。类似地,把达到均匀状态时的这个量称作 $P_{eqm}(k)$。和罐子模型相类似,我们假定存在着一些确定的转移概率。$\mathscr{H}$ 量的定义是:

$$\mathscr{H}=\sum_k P(k,t)\log\frac{P(k,t)}{P_{eqm}(k)}$$

注意式中出现的比率 $P(k,t)/P_{eqm}(k)$。设有 8 个盒子，且 $P_{eqm}(k)=1/8$。比如开始时所有粒子可能都在第一个盒子中。相应的 $P(k,t)$值为 $P(1,t)=1$，而其余都为 0。结果有$\mathscr{H}=\log[1/(1/8)]=\log 8$。随着时间的过去，粒子分布变成是均匀的，$P(k,t)=P_{eqm}(k)=1/8$。结果是$\mathscr{H}$量降为 0。根据图 26，可以看出$\mathscr{H}$的值是以均匀的方式下降的(所有论述随机过程理论的教材中对此都有说明)。这就是为什么$\mathscr{H}$起着$-S$(熵)的作用的原因。$\mathscr{H}$量的均匀减小具有非常简单的含义：它量度着系统的逐步均匀化。初始信息丢失了，系统从"有序"演变到"无序"。

注意马尔可夫过程包含着涨落，正如图 25 中清楚指明的那样。如果我们等待的时间足够长，就会回到初态。但是，我们是在处理平均值。这个均匀下降的$\mathscr{H}_M$量是用概率分布而不是用个别事件来表达的。概率分布的演变是不可逆的(在埃伦费斯特模型中，分布函数均匀地趋向于二项分布)。所以在分布函数的水平上，马尔可夫链导致一种时间的单向性。

这个时间之矢标志着马尔可夫链与量子力学中的时间演变之间的不同，在量子力学中波函数虽然与概率有关，其演变却是可逆的。它也表明像马尔可夫链那样的随机过程和不可逆性之间有着紧密联系。但是，熵的增大(或说$\mathscr{H}$量的减小)并不是基于出现在自然定律中的时间之矢，而是基于我们运用当前知识去预言未来(不是过去)行为的决定。吉布斯以他惯用的精确方式陈述这一点说：

> 先前事件与后继事件的差别就数学假设来说可能是无关紧要的，但就现实世界的事件而言却完全不同。当选择

> 我们的系综去说明现实世界中事件的概率时，我们不应忘记：虽然常根据先前事件的概率去确定后继事件的概率，但用后继事件的概率去确定先前事件概率的情形是很少见的，因为排除了对先前事件的先前概率的考虑，便很难说我们是正确的。

这一点很重要，已经引起许多讨论。概率计算确实是时间定向的。对未来的预言不同于对过去的追溯。如果这就是事情的全部，我们就必须得出结论说我们是被迫接受一种关于不可逆性的主观解释，因为过去与未来的区别仅仅取决于我们自己。换句话说，在不可逆性的主观解释(因与信息论的含糊类比而进一步被加强)中，观察者要对刻画系统发展的时间不对称性负责。由于观察者不可能一眼看去就确定出组成一个复杂系统的全部粒子的位置和速度，所以他无法知道同时包含系统过去和未来的那些瞬时状态，他也不能理解那个使他能预言系统由一个时刻到下一个时刻的发展的可逆性定律。他也不能像麦克斯韦发明的小妖那样去操纵系统，这个小妖能把高速运动和低速运动的粒子分隔开，把违反热力学的演变，即趋向于越来越不均匀的温度分布的演变，强加给一个系统。

热力学仍然是复杂系统的科学，可是从这个角度来看，复杂系统惟一的特性就是：我们关于它们的知识是有限的，随着时间的推移，我们的不确定性会越来越大。科学家不承认在不可逆性当中有什么东西把自然与观察者联系起来，而被迫承认自然只是反映了他的无知。自然是沉默无言的，不可逆性决不使我们在这物理世界中生根，它不过是人类努力及其极限的回声。

但是，可以提出一个直接相反的意见。按照这种解释，热力学应当

像我们的无知那样普遍。只有不可逆过程是应该存在的。这是对熵的所有普遍解释的绊脚石，这些解释集中到我们对初始(或边界)条件的无知上。不可逆性不是一个普适的性质。为使动力学和热力学联系起来，需要一个物理的判据，去区分可逆过程和不可逆过程。

我们将在第九章中讨论这个问题。这里，让我们回到科学史和玻耳兹曼的开拓性工作上来。

2 玻耳兹曼的突破

玻耳兹曼的主要贡献是从1872年开始的，大约比马尔可夫链的发现早三十年。他的雄心是推导出熵的“力学”解释。换句话说，在马尔可夫链中，转移概率是从外面给定的(例如，像在埃伦费斯特模型中那样)，而我们现在则必须把它们与系统的动力学行为联系起来。玻耳兹曼对这一问题是如此迷恋，以致把自己的大部分科学生命都献给了它。玻耳兹曼在他的《大众科学》(*Populäre Schriften*)中写道：“如果有人问我，我们应该给这个世纪起个什么名字，我将毫不犹豫地回答：这是达尔文世纪。”玻耳兹曼被进化论的思想深深吸引，立志要当一个物质进化的“达尔文”。

对熵作出机械论解释的第一步就是重新把分子或原子的“碰撞”概念以及统计描述的可能性引进物理描述中。这一步已由克劳修斯和麦克斯韦迈出了。由于碰撞是离散事件，所以我们可以对它们进行计数，可以估计它们的平均频率。我们还可以对碰撞进行分类，比如说，把产生一个具有给定速度 v 的粒子的碰撞和破坏一个具有速度 v 的粒子同时产生具有不同速度的分子的碰撞(即“顺”碰撞和“逆”碰撞)区分开来。

麦克斯韦提出的问题是，有没有可能定义一种气体状态，使得那些

不断改变分子速度的碰撞不再决定这些速度的分布上的变化，也就是说，不再决定对于每个速度值的平均粒子数上的变化。什么样的速度分布能使不同碰撞的效果在群体尺度上互相补偿?

麦克斯韦证明，这种特殊状态，即热力学平衡态，发生在速度分布呈著名的"钟形曲线"即高斯曲线的情况下("社会物理学"的创始人凯特尔把这种曲线作为随机性的真正表达)。麦克斯韦的理论使我们能对描述气体行为的一些基本定律作出简单的解释。温度的增高对应于分子平均速度的增大，因而也对应于与分子运动相联系的能量的增大。实验已经十分精确地证实了麦克斯韦的定律，它还提供了解决大量物理化学问题(例如，计算反应混合物中的碰撞数)的基础。

但是，玻耳兹曼打算走得更远些。他打算不仅描述平衡态，而且描述达到平衡态(即达到麦克斯韦分布)的演变过程。他想发现与熵的增大相对应的分子机制，即驱使系统从任意一种速度分布走向平衡态的机制。

玻耳兹曼还独到地在分子群体的层次上而不是在个别轨道的层次上探讨物理演变的问题。他感到这实际上相当于在完成达尔文的宏伟事业，不过这一次是在物理学上：在生物进化背后的推动力——自然选择——不能对某个个体，而只能对一个大的群体来加以确定。所以这是一个统计的概念。

玻耳兹曼的结论可以用相对而言比较简单的术语加以描述。在一定的空间，在时刻 t 的速度 v 的分布函数 $f(v,t)$ 的演变看来像是两个效应之和；在任何给定时刻 t 具有速度 v 的粒子的数目，既由于粒子自由运动又由于粒子之间的碰撞而发生变动。第一种效应可以很容易地用经典动力学的方法来计算。玻耳兹曼方法的独到之处在于他对第二种效应即由于碰撞而产生的效应的研究。面对跟踪轨道(包括相互作用)的困难，玻耳兹曼提出使用和第五章概述过的(与化学反应相联系的)概念

相类似的概念，并计算出产生或破坏一个对应于速度 v 的分子的平均碰撞数。

这里我们又一次遇到，有两种具有对立效应的过程——“顺”碰撞，它们从两个分别具有速度 v' 和 v'' 的分子开始，产生一个具有速度 v 的分子，以及“逆”碰撞，其中一个具有速度 v 的分子由于与另一个具有速度 v''' 的分子相碰撞而被破坏。和化学反应(见第五章第1节)类似，这些事件的频率和参与这些过程的分子的数目的积成比例，因而可以求出值来(当然，按历史顺序来说，玻耳兹曼的方法是1872年提出的，早于化学动力方法)。

玻耳兹曼得到的结果和在马尔可夫链中得出的结果相当类似。我们再次引入 $\mathscr{H}$ 量，不过这一次是关于速度分布 f 的。可以写出 $\mathscr{H}=\int f\log f dv$。这个量仍然只能随着时间而减小，直到达到平衡态，速度分布成为平衡的麦克斯韦分布。

近年来已经有了关于 $\mathscr{H}$ 随时间而均匀减小的大量的数字验证。它们全都证实了玻耳兹曼的预言。甚至在今天，他的动力学方程也仍在气体物理学中起着重要作用：诸如显示热传导或热扩散特性的传输系数的计算结果，能和实验数据相当吻合。

但是，我们认为玻耳兹曼的成就最伟大，是从纯概念的角度来看的：可逆现象与不可逆现象之间的差别(如我们已看到的，它是第二定律的基础)现在已转移到微观层次。速度分布的变化中由于自由运动而引起的那一部分与可逆部分相对应，由于碰撞而引起的那一部分则与不可逆部分相对应。对玻耳兹曼来说，这是熵的微观解释的关键。一个分子演变的原理产生出来了！很容易理解这个发明对跟在玻耳兹曼之后的物理学家们(包括普朗克、爱因斯坦和薛定谔)产生了多么大的吸引力。

玻耳兹曼的突破是通向过程的物理学的决定性一步。在玻耳兹

曼方程中决定时间演变的不再是与力的类型有关的哈密顿量;反之,现在与过程相联系的函数(例如散射截面)将产生运动。我们能下结论说,不可逆性的问题已经解决了,玻耳兹曼的理论已把熵约化成动力学了吗?答案很清楚:不能这样说。让我们更仔细地看一下这个问题。

3　对玻耳兹曼解释的质疑

当玻耳兹曼的奠基性论文在1872年一发表,反对意见也就出来了。玻耳兹曼真的从动力学"推导"出不可逆性了吗?轨道的可逆性定律怎能导出不可逆的演化呢?玻耳兹曼的动力学方程怎么能和动力学相容呢?容易看出,在玻耳兹曼方程中出现的对称性是与经典力学中的对称性相矛盾的。

我们已经知道,在经典动力学中,速度反演(即从 v 变为 $-v$)产生的效果与时间反演($t \to -t$)产生的一样。这是经典动力学的基本对称性,我们希望描述分布函数随时间变化的玻耳兹曼的动力学方程也能遵从这种对称性。可是它却并非如此。玻耳兹曼计算出的碰撞项对速度反演来说保持不变。有一个很简单的物理原因可以说明这一点。在玻耳兹曼的描述中无法区分朝向未来的碰撞和朝向过去的碰撞。这就是彭加勒对玻耳兹曼的推导持反对意见的基础。一个正确的计算决不能导致与其前提相矛盾的结论。正如我们已看到的那样,玻耳兹曼对于分布函数得出的动力学方程的对称性质,与动力学中的对称性质是相矛盾的。因此,玻耳兹曼不可能从动力学中"推演"出熵来。他一定是引入了某种新东西,对动力学而言是外来的东西。于是,他的结果充其量也只能代表一个现象学模型,这个模型无论怎么有用,也与动力学没有直接关系。这也是泽梅洛在1896年对玻耳兹曼提出的反对意见。

另一方面，罗施米特(Loschmidt)的反对意见使玻耳兹曼动力模型有效限度的确定成为可能。事实上，罗施米特在1876年就注意到，当发生速度反演即发生从 v 到 $-v$ 的变换后，这个模型便不再有效了。

我们通过一个假想实验来解释这一点。设开始时气体处于非平衡条件下，让它发生演变直到时刻 t_0。然后我们令速度反演。系统回到它原来的状态。结果，在 $t=0$ 和 $t=2t_0$ 时，玻耳兹曼的熵是一样的。

我们可以把这个假想实验扩大一下。开始时是用氢和氧的混合体，经过一段时间后就出现水。如果我们让速度反演，我们将回到初始状态，即只有氢和氧而没有水。

有趣的是，在实验室里或在计算机上做实验时，我们实际上可以做到让速度反演。例如在图27和图28中，对二维硬球即硬圆盘计算了玻耳兹曼的$\mathscr{H}$量，开始时圆盘置于具有各向同性速度分布的格点处。计算结果符合玻耳兹曼的预言。

如果经过50或100次碰撞之后（相当于在稀薄气体中经过大约10^{-6}秒），使速度反演，就会得到一个新的系综。现在，经过速度反演，玻耳兹曼的$\mathscr{H}$量不再是减小而是增大。

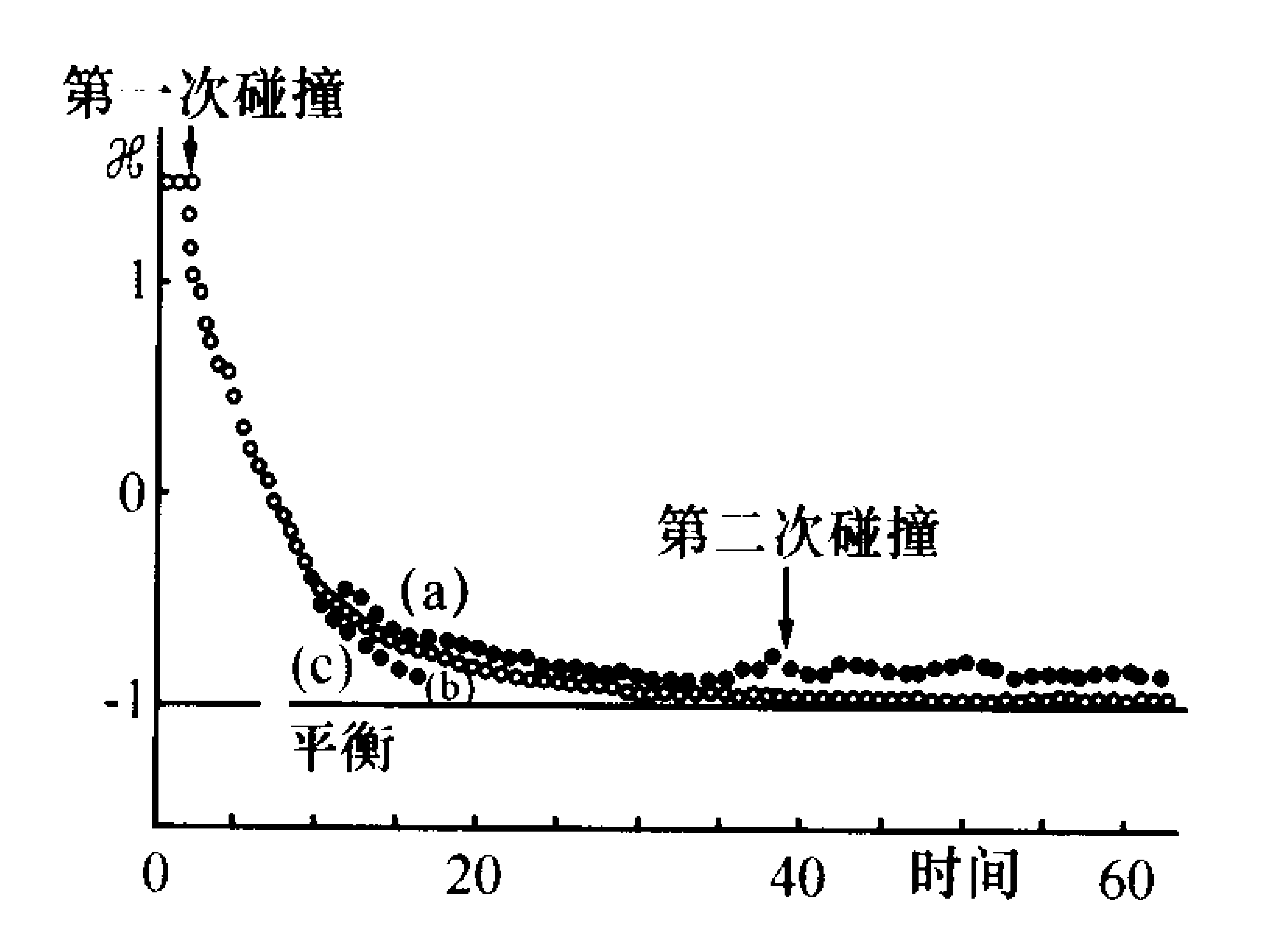


图27 用计算机模拟 N 个“硬球”时$\mathscr{H}$量随时间的变化过程

(a)相应于 $N=100$，(b)相应于 $N=484$，(c)相应于 $N=1225$。

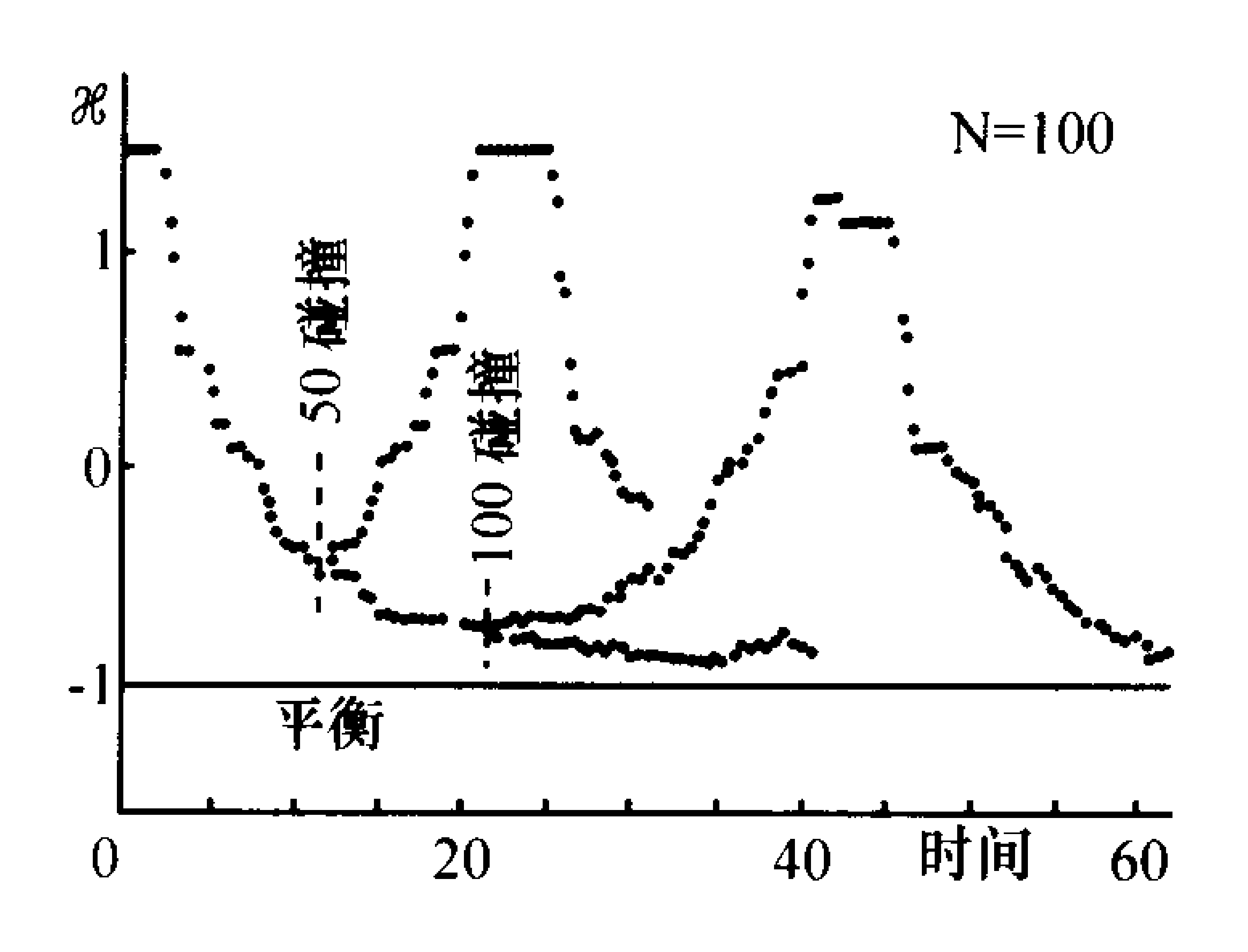


图 28 用 100 个“硬球”作的模拟

经过 50 或 100 次碰撞后进行速度反演时ℋ量的变化情况。

在自旋回波实验或等离子体回波实验中也可以产生类似的情形。在那些实验中，经过有限的一段时间后，也可以观察到一种按玻耳兹曼的意义来说是“反热力学”的行为。

但重要的是，要注意到，当发生反演现象的时间间隔 t_0 越大时，速度反演实验就越难实现。

为了能够返回原来的状态，气体必须记住它在从 0 到 t_0 这一时间间隔内所遇到的每一件事。必须有一个信息的“存贮”。我们可以从粒子间的相关性这个角度来表示这个信息的存贮。我们将在第九章中再来讨论这个相关性的问题。这里只提一下这一点：相关性与碰撞之间的这个关系恰好正是玻耳兹曼没有考虑到的一个要素。当罗施米特用这一点来诘难玻耳兹曼时，他不得不承认没有出路：以相反方向发生的碰撞会把前面所做过的事都抵消掉，而系统只得返回到它的初始状态。因此，ℋ函数必须也增大，直到再次达到它的初始值为止。于是，速度反演要求能区分玻耳兹曼推理适用的场合和不适用的场合。

问题一经提出(在 1894 年)，就很容易识别这个局限性的本性。玻耳兹曼统计过程的有效性取决于假定分子在碰撞前的行为是彼此无关

的。这个关于初始条件的假定称为“分子混沌”假定。由速度反演建立的初始条件不服从这一假定。如果使系统“在时间上倒转回去”，将产生一种新的“异常”状态，就是说，某些分子在后来的某一可以预先确定的时刻注定要相碰，并在那个时刻注定要发生一个预先确定的速度变化，而不论在速度反演的那一瞬间它们可能隔开多远。

所以说，速度反演产生一个非常有组织的系统，因而“分子混沌”的假定在这里无效了。各个不同的碰撞却产生出一种外表看来是很有目的性的行为，就好像是通过事先建立起来的协调而实现的。

但是问题还不止于此。从有序向无序的过渡有什么意义呢?在埃伦费斯特的罐子实验中，这很清楚——系统将发生演变直至达到均匀为止。可是其他情形就不是那样清楚了；我们可以用计算机做实验，实验中相互作用着的粒子最初是随机分布的，最后形成格子。我们还要从有序向无序运动吗?答案是不明显的。为了理解有序和无序，首先我们必须定义一些对象，通过这些对象才能使用有序和无序这些概念。在稀薄气体的情形中，从动力学对象到热力学对象的运动是容易的，这已为玻耳兹曼的工作所表明。但是在致密系统的情形中(其中的分子是相互作用着的)，这样做就不那么容易了。

由于这些困难，玻耳兹曼的有创见的开拓性工作仍是不完备的。

4 动力学和热力学：两个分离的世界

我们已经注意到，轨道是与不可逆性的思想不相容的。但是对轨道的研究并不是我们能够给出动力学表述的惟一途径。此外还有由吉布斯和爱因斯坦引进的系综的理论，当系统是由大量分子所组成的时候，系综理论有其特殊的意义。吉布斯-爱因斯坦系综理论中主要的新因素就是可以与初始条件的任何精确说明完全无关地去表述动力学

理论。

系综理论在“相空间”中表示动力学系统。一个点粒子的动力学态是用位置(一个有三个分量的向量)和动量(也是一个有三个分量的向量)来说明的。我们可以用两个在三维空间中的点或一个在六维空间(由坐标和动量组成)中的点来代表这个态。这就是相空间。这种几何的表示方式可以推广到由 n 个粒子组成的任意系统。那时我们将需要 $6 \times n$ 个数来说明这个系统的状态，或者说，我们可以用 $6n$ 维相空间中的一个点来说明这个系统。然后就可以用这个相空间中的一条轨道去描述系统随时间的变化过程。

我们已经讲过，一个宏观系统的确切的初始条件是永远不会知道的。虽然如此，却没有什么东西能妨碍我们用一些点(这些点对应于各种不同的动力学态，而这些态则是与我们已知的关于该系统的信息相容的)的“系综”去表示这个系统。相空间的每个区域可以包含无穷多个代表点，点的密度就量度着在该区域中实际发现该系统的概率。更为便利的是不引进无穷多个离散点，而引进相空间中的代表点的连续密度分布。我们把相空间中的这个密度记作 ρ $(q_1, \cdots, q_{3n}, p_1, \cdots, p_{3n})$，其中 q_1，$q_2, \cdots, q_{3n}$ 是这 n 个点的坐标，$p_1, p_2, \cdots, p_{3n}$ 是动量(每个点有三个坐标和三个动量)。这密度就量度着在相空间中点 $q_1, \cdots, q_{3n}, p_1, \cdots, p_{3n}$ 的周围发现一个动力学系统的概率。

按照上述提法，密度函数 ρ 可以看作是一种理想化，一种人为的结构。而相空间中一点的轨道则是“直接”与“自然”行为的描述相对应的。可是事实上正是点而并非密度对应于一种理想化。确实，我们从来未曾无限精确地知道初始状态，以便能把相空间中的一个区域压缩为一个点；我们只能确定从和我们对该系统的初态所知道的情况相对应的代表点的系综出发的轨道的系综。密度函数 ρ 代表了对一个系统的了解，

了解得越精确，则相空间中密度函数不为零而系统可能被找到的区域就越小。假如各处的密度函数具有某个一致的值，那么我们关于该系统的状态便什么也不知道。系统可能处于与它的动力学结构相容的任何一种可能态中。

根据这种观点，一个点便代表了我们对于一个系统所可能有的最大了解。这是一个极限过程的结果，是我们的了解越来越精确的结果。正如我们将在第九章中看到的，一个基本的问题是确定一个极限过程在何时是真正可能的。由于精确程度的不断提高，这个过程的含义就是我们从一个密度函数 ρ 不为 0 的区域走向另一个更小的且在前一个区域之内的区域。我们可以把这个过程继续下去，直到包含着该系统的区域达到任意小。不过正如我们将要看到的，必须注意：任意小并不意味着 0，不能先验地肯定这个极限过程将导致坚定地预言出一条确定轨道的可能性。

吉布斯和爱因斯坦引进的系综理论，是玻耳兹曼工作的自然继续。根据这种观点，相空间中的密度函数 ρ 取代了玻耳兹曼所使用的速度分布函数 f。但是 ρ 的物理内容超过了 f。和 f 一样，密度函数 ρ 也确定了速度分布情况，可是它还包含有其他信息，比如相隔一定距离的两个粒子相遇的概率。特别是，上一节中我们讨论过的粒子间的关系现在包含在密度函数 ρ 中。事实上，这个函数包含了有关 n 体系统的全部统计特性的完整信息。

现在我们必须描述相空间中密度函数的演变过程。初看起来，这任务好像是比玻耳兹曼给自己提出的关于速度分布函数的任务还要雄心勃勃，其实并非如此。第二章中讨论过的哈密顿方程使我们能够不经过什么进一步的近似就得到有关 ρ 变化情况的确切方程。这就是所谓的刘维方程，我们将在第九章中再去讲它。这里我们只想指出，根据哈密

顿动力学的性质，相空间中密度函数 ρ 的演化是一种不可压缩的流体的演化。一旦由代表点占据了相空间里一个体积为 V 的区域，这个体积就将在时间改变时维持恒定。这个区域的形状可以任意改变，但体积的值保持相同(参阅图 29)。

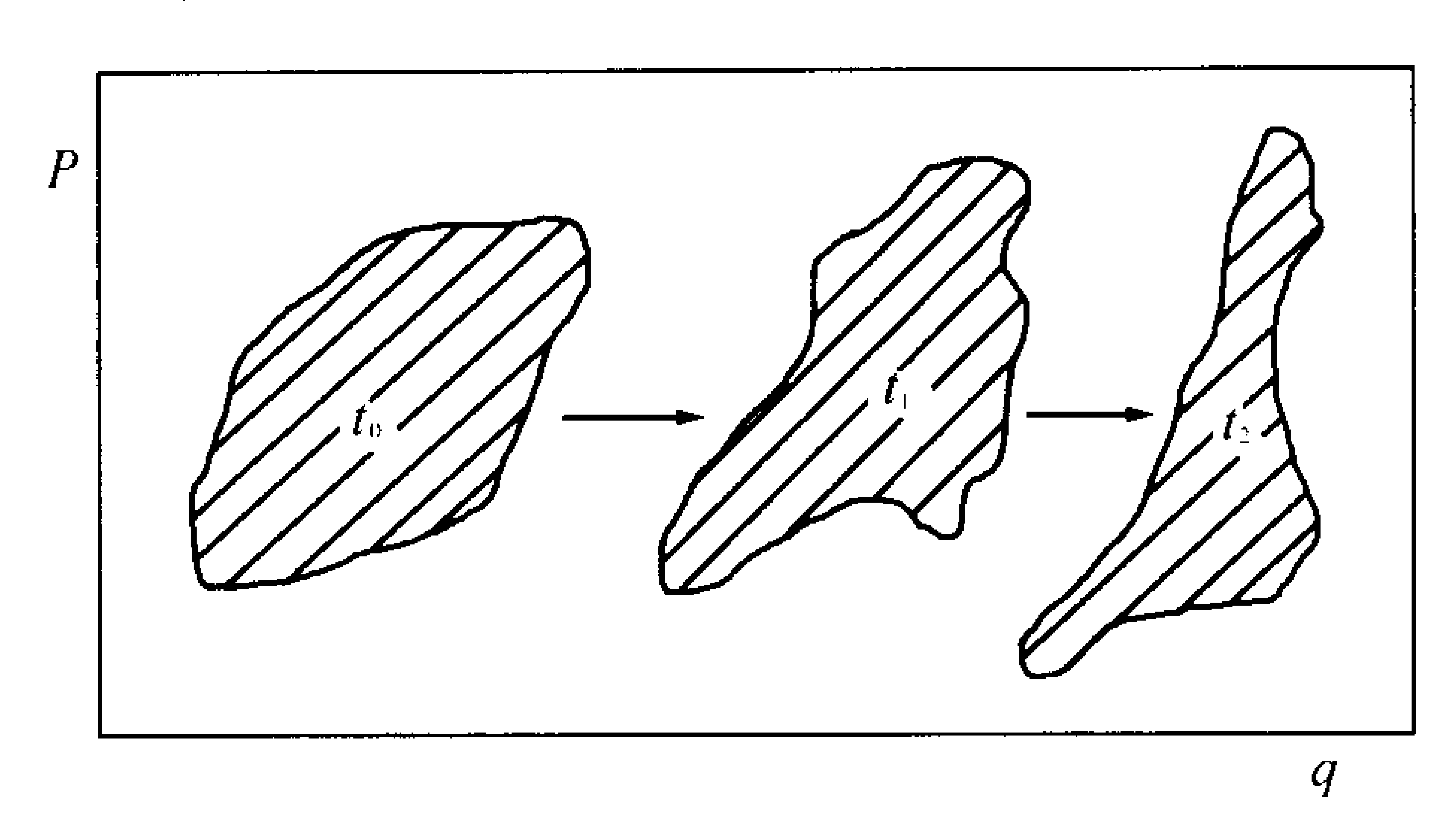


图 29　一个含有某系统代表点的“体积”在相空间中随时间的变化情况

形状改变而体积不变。在相空间中的位置则由坐标 q 和动量 p 来说明。

于是，吉布斯的系综理论使我们能够把统计学观点(研究用 ρ 来描述的“群体”)和动力学定律严格地结合起来。它还使我们能给出热力学平衡态的一个更为精确的表示。因此，在一个孤立系统的情形中，这个代表点的系综对应于一切具有相同能量 E 的那些系统。只有在对应于相空间里指定能量值的“微正则表面”上，密度 ρ 才不为 0。起初，密度 ρ 可以任意分布在这个表面上。在平衡时，ρ 必须不再随时间而变动，而且一定与具体的初始状态无关。所以从 ρ 的演变来看，趋向平衡有一个简单的含义。在微正则表面上，分布函数 ρ 成为均匀的。这个表面上的每个点都有同样的实际代表该系统的概率。这对应于“微正则系综”。

系综理论能使我们更接近于解决不可逆性的问题吗？玻耳兹曼的理论以速度分布函数 f 来描述热力学的熵。通过引进他的 $\mathscr{H}$ 量，他得出了这个结果。正如我们已看到的那样，系统随时间变化直至达到麦克斯韦分布，而在这个变化过程中，$\mathscr{H}$ 量均匀地减小。现在我们能不能以更

一般的形式把相空间中的分布 ρ 向着微正则系综的变化当作熵增大的基础呢?把用 f 来表达的玻耳兹曼量 $\mathscr{H}$ 代之以一个用完全同样的方式不过这一次是用 ρ 来定义的吉布斯量 $\mathscr{H}_G$，是不是就足以解决这个问题呢?不幸,对这两个问题的回答都是:“否。”如果我们使用描述相空间密度 ρ 的演化过程的刘维方程，并且考虑到上面提到过的相空间里体积保持不变的特性,那么立即就可以得出结论:$\mathscr{H}_G$ 是一个常量,所以它不能代表熵。比起玻耳兹曼来,这似乎是倒退了一步,而不是前进了一步!

尽管如此,吉布斯的结论仍然有非常重要的意义。我们已经讨论过有序与无序的思想的含糊性。$\mathscr{H}_G$ 量的恒定性告诉我们,在动力学理论的框架之内,从来就没有任何秩序的变化!由 $\mathscr{H}_G$ 所表达的“信息”保持不变。这一点可以理解如下:我们已经知道,碰撞引进了相关性。从速度的角度来看,碰撞的结果就是随机化;所以我们可以把这个过程描述为一种从有序到无序的过渡，但由于碰撞而得到的相关性的出现却指向相反的方向,即向着由无序到有序的过渡!吉布斯的结果表明,这两种作用正好互相抵消。

因此，我们得出一个重要的结论。无论我们使用什么样的表示方法,是轨道思想,还是吉布斯-爱因斯坦系综理论,我们都不可能推演出一种对每一个满足经典(或量子)动力学定律的系统都有效的不可逆过程理论。甚至无法说从有序到无序的过渡!我们该怎样理解这些否定性的结论呢?任何不可逆过程理论都是和动力学(经典的或量子的)绝对冲突的吗?人们多次建议,我们可以加上一些宇宙学的项,用来表达膨胀着的宇宙对运动方程的影响。这些宇宙学项最终将提供时间之矢。但是这种建议却难以接受。一方面,对我们该怎样加上这些项是不清楚的;而且精确的动力学实验似乎排斥这些项的存在，至少在我们这里所关

心的地球的尺度上是如此(试想一下,比如航天实验的精确性,它高度地肯定了牛顿方程)。另一方面,如同我们已讲过的那样,我们是生活在一个多元论的宇宙之中,其中可逆与不可逆过程并存,都镶嵌在这个膨胀着的宇宙中。

一个甚至更为根本的结论是要和爱因斯坦一道肯定:时间作为一种不可逆性只是个幻觉,根本不可能在客观物理世界中找到它的位置。幸而还有别的出路,我们将在第九章中加以探讨。我们反复提到的不可逆性不是一个普适的性质,因此不能指望从动力学中得到不可逆性的一般推导。

吉布斯的系综理论对于轨道动力学来说只是引进了一个附加因素,然而是非常重要的因素——我们对精确初始条件的无知。未必这种无知单独导致不可逆性。

因此我们不会对我们的失败感到奇怪。我们还没有表述出动力学系统为了导致不可逆过程而必须具有的一些特性。

为什么有那么多的科学家如此轻易地接受了对于不可逆性的主观解释呢?可能它的一部分吸引力在于这样的事实:如我们已看到的,熵的不可逆增大首先是和操作的不完善相联系的,是和我们对于那些本来按理想来说是可逆的操作缺乏控制相联系的。

但是只要把与技术问题的不相干联系撇在一旁,上面这种解释就成为荒唐的了。我们想必还记得,第二定律是在怎样的场合获得作为自然的时间之矢的重要意义的。按照主观的解释,化学亲和力、热传导、粘滞性等等这一切与不可逆的熵产生相联系的性质都和观测者有关。还不止于此,起源于不可逆性的组织现象在生物学中起作用的程度,使我们不能再把它们认为是由于我们的无知而产生的简单幻觉。我们自身——活生生的能够观察和操作的生物——只是由我们的不完善的感

觉所产生的虚构之物吗?生与死之间的区别难道也仅仅是幻觉吗?

因此，热力学理论近来的发展已经加剧了动力学与热力学之间的冲突。当熵的建设性作用已被理解，涨落放大的可能性已被发现的时候，还试图把热力学的成果缩小成只不过是由于我们认识不完备而引起的近似,看来就是执迷不悟了。反之,也很难以不可逆性的名义摈弃动力学:在一个理想摆的运动中就没有不可逆性。显然,有着两个对立的世界,一个轨道世界和一个过程世界,而且没有什么办法肯定一个而否定另一个。

在一定程度上，这个冲突和引起辩证唯物主义产生的那场冲突有些类似。我们已经在第五章和第六章中叙述过一个可以称为“历史的”自然,就是说能够发展和创新的自然。自然史的思想作为唯物主义的一个完整部分,是马克思所断言,并由恩格斯所详细论述过的。当代物理学的发展,不可逆性所起的建设性作用的发现,在自然科学中提出了一个早已由唯物主义者提出的问题。对他们来说,认识自然就意味着把自然界理解为能产生人类和人类社会的自然界。

而且,在恩格斯写作《自然辩证法》一书的那个时代,物理科学看来已经摈弃了机械论的世界观,而更接近于自然界的历史发展的思想。恩格斯谈到了三大主要发现:能量及支配其性质转换的定律,作为生命的基本组成部分的细胞,和达尔文关于物种进化的发现。鉴于这些伟大的发现,恩格斯得出结论:机械论的世界观已经死亡。

但是机械论却依然是辩证唯物主义面临的基本难题。辩证法的普遍规律与同样普适的机械运动定律之间的关系是什么? 机械运动定律是在达到一定的阶段之后就不再适用了呢，还是它们本来就是虚假的或不完备的?回到我们先前的那个问题,过程世界和轨道世界如何才能联系在一起呢?

不过，批判关于不可逆性的主观主义解释并指出它的弱点，这是容易的；而超出它的范围之外，表述一种不可逆过程的“客观”理论，就不那么容易了。这个课题的历史上有过一些戏剧性的插曲。许多人相信，也许就是由于认识了所遇到的这些根本困难，才导致玻耳兹曼在1906年的自杀。

5 玻耳兹曼和时间之矢

我们已经注意到，玻耳兹曼起初以为他能够证明，动力学系统朝着高概率或高配容数状态的演化确定了时间之矢：即配容数随着时间单向地增大。我们也讨论过彭加勒和泽梅洛的反对意见。彭加勒证明了每个封闭的动力学系统在一定的时候返回到它原先的状态。因此，所有的状态永远在重现。像“时间之矢”这样一个东西如何能与熵的增大联系起来呢?这导致玻耳兹曼的态度上的一个戏剧性的转变。他放弃了证明有一个客观的时间之矢存在的打算，而引入了另外一种思想，这思想在某种意义上把熵增大定律约化成一种同义反复。现在他认为时间之矢不过是一种约定，是我们(或许可以说是所有活着的生物)把它引进到一个在过去与未来之间没有客观差别的世界中来的。我们引用一下玻耳兹曼回答泽梅洛的话：

> 我们有两种可以选择的图式。或者，我们假定整个宇宙在当前时刻处于非常不可几的状态。或者，我们假定这个不可几状态持续的千秋万代和从这里到天狼星的距离，与整个宇宙的年龄和尺寸相比是微乎其微的。这样的宇宙从整体上说是处于热平衡态，因而是死的。在这样的宇宙中，到处都可以发现一个个相对来说比较小(具有我们银河系的尺寸)的

区域，这些区域(我们可以称之为一个个“世界”)在一段段相对来说比较短(比起“千秋万代”来)的时间里显著地偏离热平衡态。在这些世界中间，它们的状态的概率(亦即熵)不时地增大着，并同样不时地减小着。在整个宇宙中，时间的两个方向是不能区分的，就好像在空间中不能区分上或下一样。但是，恰似在地球表面的某个地方我们可以把指向地心的方向称为“下”那样，一个发现自己在某一时期处在这样一个“世界”内的活着的有机体，可以把时间的“方向”定义为从小概率态走向大概率态(前者称为“过去”，后者称为“未来”)。而且依照这个定义他会发现，他自己那个与宇宙其余地方隔开的小区域“起初”总是处于一个不可几状态。我以为这个观察事物的方法是使我们能理解第二定律的有效性和每个个别世界的热寂现象而不必求助于整个宇宙从一个确定的初态向一个终态的单方向变化的惟一方法。

参考一下卡尔·波普尔提供的一张图(图 30)，可以使玻耳兹曼的思想变得更清晰。时间之矢是任意的，像由重力场确定的垂直方向一样。

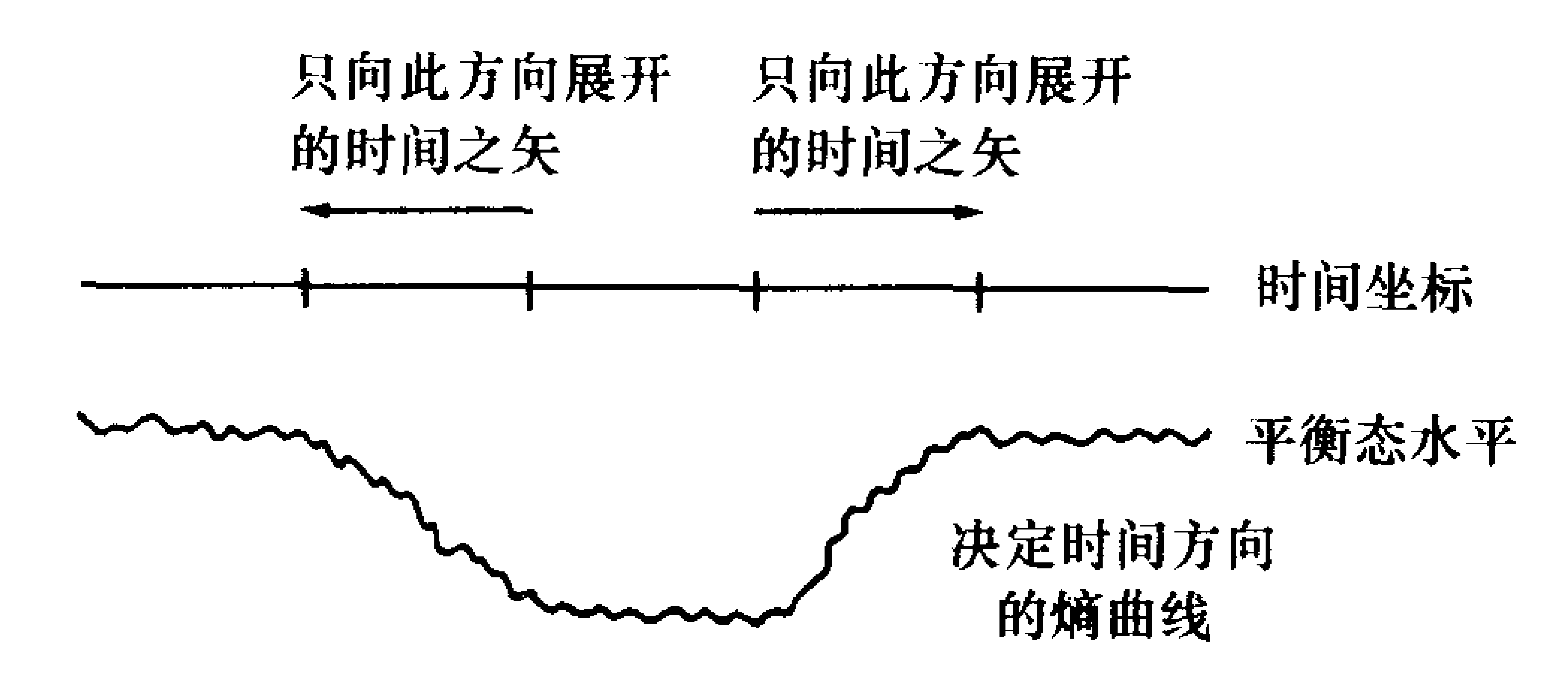


图 30 波普尔用来表示玻耳兹曼关于时间之矢的宇宙学解释(见正文)的示意图

波普尔在评论玻耳兹曼的文章时写道：

> 我认为，玻耳兹曼的思想以其大胆和漂亮而使人震惊。但是我也认为，这是很难站得住脚的，至少对一个现实主义者来说是这样。它把单方向的变化贬为一种幻觉。这就使广岛的大灾难成为一种幻觉，因而使我们的世界以及我们对我们这个世界要更多地发现的一切努力也都成为幻觉。因而它像每一种唯心论一样，自己打败了自己。玻耳兹曼的唯心主义的特别假设是和他自己的现实主义的和近乎激烈地坚持过的反唯心主义的哲学相冲突的，是和他的强烈的求知欲望相冲突的。

我们完全赞成波普尔的评论，而且我们相信，该是把玻耳兹曼的任务重新担当起来的时候了。正如我们已经说过的那样，二十世纪已经看到了理论物理学中重大的概念革命，这产生了把动力学和热力学统一起来的新的希望。我们正在进入一个在时间史中的新纪元，在这里，存在和演化这两者可以归并到一个单一的不矛盾的观点中去。

第九章　不可逆性——熵垒

1　熵和时间之矢

在上一章,我们讨论了不可逆过程的微观理论中的一些难题。这理论与经典动力学或量子动力学的关系不可能是简单的——不可逆性和伴随着它的熵增大现象都不可能是动力学的一般结果。不可逆过程的微观理论还需要另外的更为特殊的条件。我们必须承认有一个多元论的世界,在这个世界中,可逆过程与不可逆过程并存着。但是这样一个世界是不容易被接受的。

伏尔泰在他的《哲学词典》中就命运的问题写道:

> ……一切都受到不变规律的支配……每一件事都是事先安排好的……每一件事都是必然的结果。……有一些人被这个真理吓住了,他们只承认它的一半,就像那些还了一半债给债权人而请求再延长一些时间去还清其余部分的债务人一样。他们说,有一些事件是必然的,

> 而另一些不是。如果已经发生的事情中只有一部分是必然要发生的而另一部分却不是，那是很奇怪的。……我当然要有热情来写下这一点，你也必须要有激情来谴责我；你我都同样是傻瓜，是命运手中的玩物。你的天性是作恶，而我的天性是热爱真理，而且不管你怎样，我也要把它公开发表出来。

无论这些先验的论断听上去多么有说服力，它们只会把我们引向歧途。伏尔泰的推理方法是牛顿式的：自然界总是自行其是。但奇怪的是，今天我们发现我们自己是在一个伏尔泰嘲笑过的奇怪的世界中；我们为发现了自然界呈现的性质上的差异而惊讶不已。

人们在两个极端之间犹豫不决，这一点也不奇怪。它们之中一个是如我们已经提到过的由爱因斯坦提倡的在物理学中根本排除不可逆性，另一个则是像在怀特海的过程概念中那样强调不可逆性的重要性。正如我们在第五章和第六章中所表明的那样，不可逆性无疑在宏观层次上存在着，而且有着重要的建设性作用。因此，在微观世界里一定有着某种东西，它的表现就是宏观的不可逆性。

微观理论必须说明两个紧密相连的因素。首先我们必须按照玻耳兹曼那样，试着为随时间而均匀变化的熵(或玻耳兹曼的$\mathcal{H}$函数)构造一个微观模型。这个熵的变化必须确定我们的时间之矢。对于孤立系统来说，熵的增大一定是表示系统在变老。

在不能把熵同所考虑的那种类型的过程联系起来的情况下，我们常常也可以有一个时间之矢。波普尔提出了一个有单向过程(即有时间之矢)的系统的简单例子。

> 设有一部影片，拍摄的是一片大的水面，起初该水面是平静的，然后落入了一块石头。把该影片倒过来放映，就会看到一些逐渐收缩的同心圆状的波，其振幅逐渐增大。而且紧接着最高的波峰之后，会看到水面无扰动的一个圆形区域逐渐向圆心收拢。不能把这看作是一个可能的经典过程。假如这个过程可能发生，那么它将需要巨大数目的远程相干波发生器，而且为了能够被说明，这些波的相互协调必须在影片中表现得就像是起源于一个中心。但是，当我们试着倒映这个修改过的影片时，又恰恰产生同样的困难。

的确，无论用什么技术手段，总有一个与中心相隔的距离，在这个距离之外，我们是无法产生一个收缩波的。有一些单方向的过程。波普尔提出的那种类型的其他许多过程也可以想象得到：我们从来不会看到能量从四面八方聚集到一个星球上，伴随着吸收这些能量的反向核反应。

除此之外，还存在着其他的时间之矢——例如宇宙学矢(见加德纳所作的出色的说明)。如果我们假定宇宙是从大爆炸开始的，这显然隐含着在宇观层次上的一种时间秩序。宇宙的大小在持续地增长着，但我们并不能用熵来判定宇宙的半径。的确，像我们提到的那样，在这个不断膨胀的宇宙里我们既看到了可逆过程也看到了不可逆过程。同样，在基本粒子物理学中存在着呈现所谓 T–违反的过程。T–违反的意思就是指描述系统在 $+t$ 时的演变的方程与描述系统在 $-t$ 时的演变的方程是不同的。但是，这个 T–违反并不妨碍我们把它也归入通常的(哈密顿的)动力学表述中去。任何熵函数都不能被定义为 T–违反的结果。

这使我们回想起 1909 年发表的爱因斯坦和里茨(Ritz)之间的著名的讨论。这是一篇极不寻常的论文，它非常短，还不满一页。它简直就是

一篇不同意见的声明。爱因斯坦断言，不可逆性是玻耳兹曼引进的概率概念的一种后果。相反，里茨宣称："滞后"波和"超前"波之间的差别起着主要作用。这个差别使我们想起波普尔的论证。我们在池塘里看到的波就是滞后波，它们是随在石头被投入水中之后发生的。

爱因斯坦和里茨都把一些根本性的因素引进有关不可逆性的讨论中，但他们各自都只强调了事情的一部分。我们在第八章中已经提到过，概率事先假定了一个时间方向，所以不能用来导出时间之矢。我们也已提到过，排除了像超前波那样的过程也未必能导出第二定律的表述。我们同时需要这两种主张。

2 作为对称破缺过程的不可逆性

在讨论不可逆性问题之前，有必要回忆一下另一种对称破缺即空间对称破缺怎么能被推导出来。在描述反应扩散系统的方程中，左和右起着同样的作用(当我们实行空间反演 $r \to -r$ 时扩散方程保持不变)。但是正如我们已经看到的那样，在分叉可能导出的一些解中，这个对称性是破缺的(见第五章)。例如某些成分的浓度可能变得在左边比在右边要高一些。方程的对称仅要求对称破缺的解成对地出现。

当然，有许多反应扩散方程不呈现分叉，因而也就不会打破空间对称性。打破空间对称需要有其他一些非常特殊的条件。这对于理解那些我们在此主要感兴趣的时间对称破缺问题是很有用处的。我们必须找出这样一些系统，它们的运动方程可能实现较低对称性。

对于时间反演 $t \to -t$，方程确实是不变的。但方程的实现却可以与丢失这种对称性的演变相对应。由方程的对称性所加上的惟一条件就是这种实现要以成对的方式出现。例如，如果我们找到一个在很远的未来(不是很远的过去)达到平衡的解，那么我们也应当找到一个在很远的过

去(不是很远的未来)达到平衡的解。对称破缺的解是成对出现的。

一旦我们找到了这样一种情况，我们就能表达第二定律的内在含义了。它变成了一个选择原则，即在两类解中只有一类可以实现，或说可能在自然界中被观察到。在第二定律适用的所有场合，它都表达了自然界的一种内在的极化。它永远不可能是动力学本身的结果。它只能作为一种附加的选择原则而出现，它的实现是被动力学传播出来的。仅在几年之前，试图实现这样的计划似乎还是不可能的。但是几十年来，动力学已经有了显著的进步。现在我们已经能够详细地了解，这些对称破缺解是怎样在“足够复杂”的动力学系统中显现出来的，由热力学第二定律表达的选择原则在微观层次上究竟意味着什么。这正是我们在本章的以后部分想要介绍的。

3 经典概念的局限性

让我们从经典力学开始。正如我们已经提到过的，如果轨道就是基本的不可约化的元素，那么世界就如同构成它的轨道一样是可逆的。在这种描述中没有熵，也没有时间之矢；但是由于出人意料的近年来研究的结果，轨道概念的有效程度要比我们本来预想的还更有限得多。让我们回过头来看一看在第八章中介绍过的吉布斯和爱因斯坦的系综理论。我们已经看到，吉布斯和爱因斯坦把相空间引入物理学，以便说明我们不“知道”由大量粒子构成的系统的初始状态这样一个事实。在他们看来，相空间中的分布函数仅仅是一个辅助结构，用以表明我们对于一种在道理上确定的状态在实际上的无知。但是，一旦能够表明对某些类型的系统无限精确地确定初始条件会导致自相矛盾的过程，整个问题就会具有新的维。一旦如此，我们从来不知道单一轨道而只知道一组轨道（即相空间中的一个轨道

系综)这个事实就不单单表明我们知识上的局限性,它还成为研究动力学的一条新途径的起点。

确实,在简单情况下没有什么问题。让我们举一个摆的例子。根据初始条件的不同,这个摆可能振荡,也可能绕轴旋转。如果要它旋转,它的动能必须足够大,使它在达到垂直位置之前不至于"下落回去"。这两种类型的运动确定了相空间中两个不相连的区域。其原因很简单,旋转比振荡需要更多的能量(见图 31)。

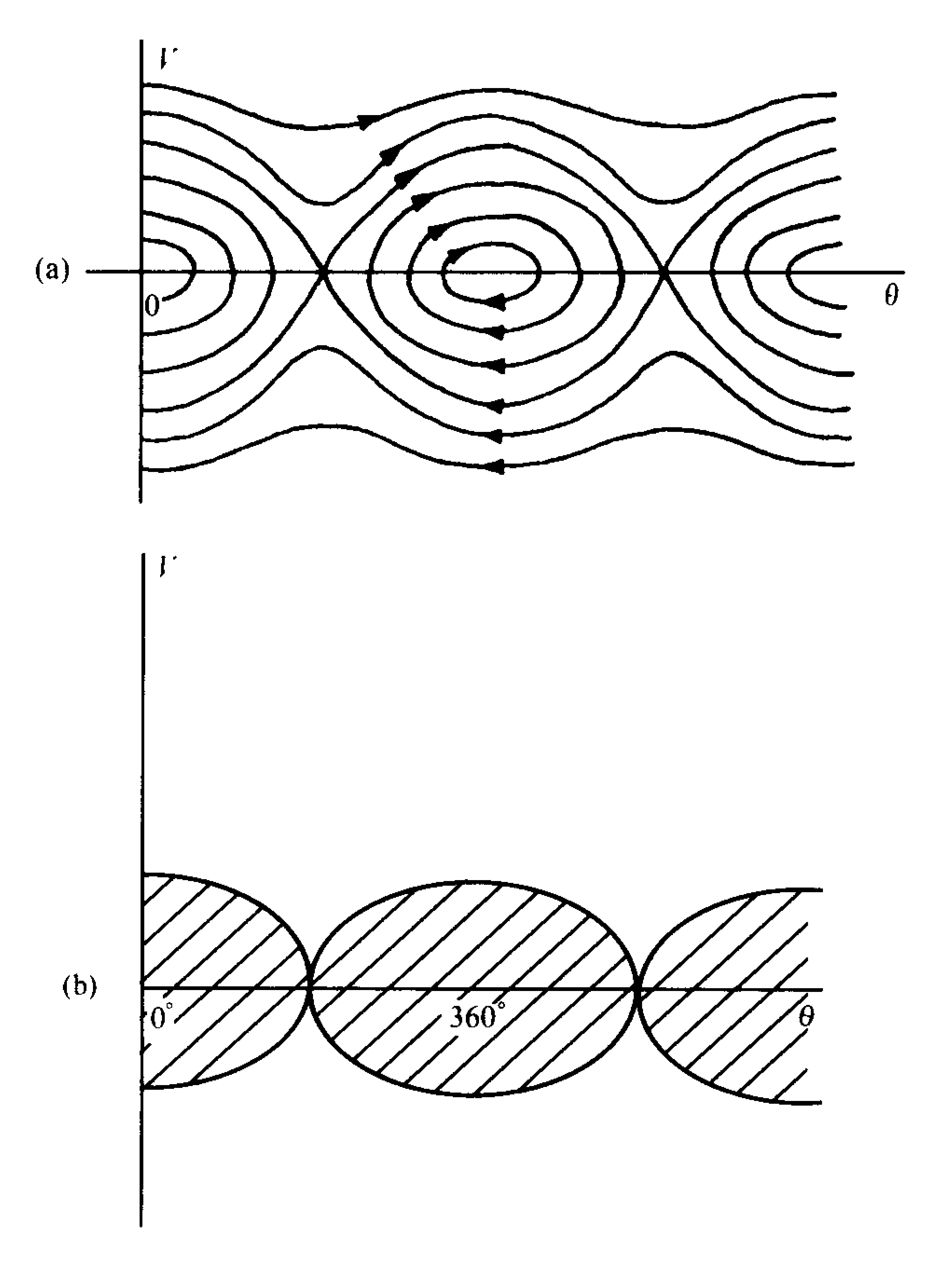


图 31 一个摆在空间运动情况的示意

图中 V 是速度,θ 是偏转角。(a)在(V, θ)空间的典型轨道;
(b)阴影区域对应于振荡,其余部分对应于旋转。

如果我们的测量允许我们设定系统起初是在一个给定的区域之内，我们就可以满有把握地预言这个摆将要表现出的运动形式。我们可以提高测量精度并把摆的初始状态限定在前一区域范围内的一个更小的区域中。无论如何，我们都知道系统在每时每刻的行为，不会发生任何新的料想不到的事情。

二十世纪所完成的最惊人的成果之一却是上面那种论断在一般情况下并不正确。相反，“大多数”动力学系统是以相当不稳定的方式行动的。我们用 + 表示一种轨道(例如振荡轨道)，而用 * 表示另一种轨道(例如和旋转相应的轨道)。结果我们发现，在一般情况下，并不像图 31 中那样有两个分开的区域，而是有一种混合状态，使得向单个点的过渡成为含糊的(见图 32)。如果我们只知道我们系统的初始状态是在区域 A 中，那我们还不能推定它的轨道是 + 型的；它同样可能是 * 型的。即使我们把区域 A 缩小为它其中的一个更小的区域以提高精度，我们也不会有

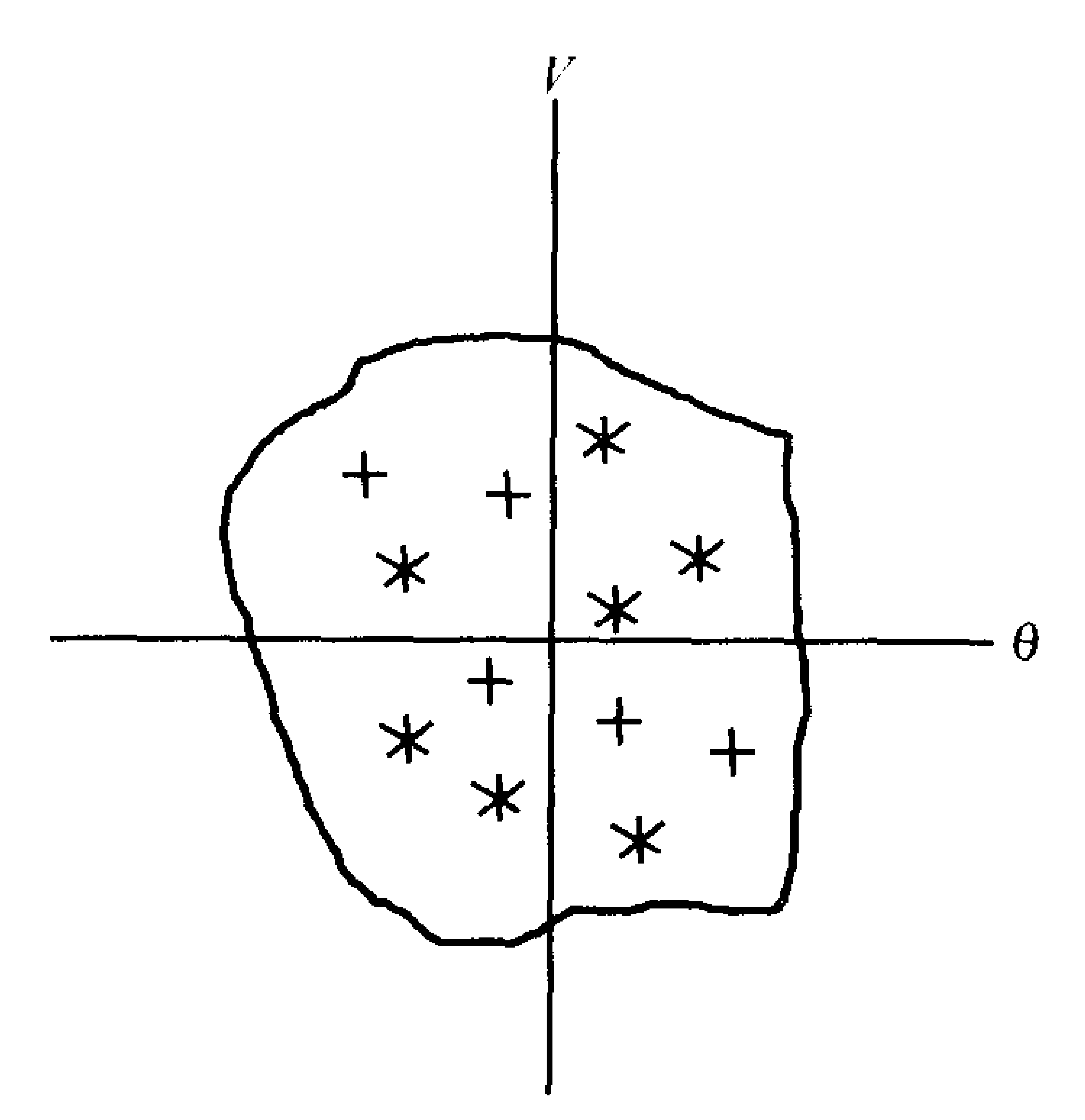


图 32 呈现动力学不稳定性的系统的相空间 V 的任意小的任一区域的示意图

和摆的例子一样，有两种类型的轨道(这里用 + 和 * 来表示)，但是和摆不一样，在每个任意小的区域内都出现这两种运动。

什么别的结果，因为不确定性依然如故。在无论多么小的每个区域里，总是有属于这两种轨道中的每一种的状态。

对于这样的系统，轨道变成了不可观察的。这种不稳定性表明了牛顿理想化的局限性。牛顿动力学两大基本要素即动力学定律和初始条件的独立性被破坏了：动力学定律陷入了和初始条件的确定相冲突的境地。我们可以回想一下阿那克萨哥拉考虑自然界那丰富多彩的创造力的方式。他认为各种事物在它的每一个部分内都包含着无穷多的不同性质的种子。我们这里也是如此，相空间的每个区域都保持着丰富多彩的不同性质的行为。

从这种观点来看，决定论的轨道好像只有有限的适用性。由于我们不仅在实践上而且在理论上不能利用轨道来描述一个系统，而不得不运用相空间中有限的小区域所对应的分布函数，所以我们只能预言系统的统计性的未来。

我们的朋友利昂·罗森菲尔德常说，概念只能通过其局限性被理解。在这个意义上讲，我们现在看来算是对经典力学有了一个较好的理解了，经典力学的表述为近代科学铺平了道路。

但是，这个新观点是如何出现的呢？这里我们不得不叙述一下动力学在本世纪内所经历过的戏剧性的变化。尽管动力学被看作是知识的一个完备、封闭分支的原型，但在实际上它已经被完全改造了。

4 动力学的更新

在本书的第一部分，我们提供了19世纪时对动力学的那种表述。这是至今在许多教科书中仍然采用的表达方式。动力学系统的原型是可积系统。为了解出运动方程，我们只需找出“好”的坐标，使得相应的

时刻是运动不变量。运动实体间的相互作用以这种方式被消除。但是，这个计划失败了。我们已经提到过，在19世纪末，布伦斯和彭加勒证明了大多数动力学系统(从著名的"三体"问题开始)都是不可积的。

另一方面，正是那个按系综理论来说明的趋向平衡态的思想，要求我们超出可积系统的理想化之外。如在第八章中所看到的，按照系综理论，当一个孤立系统可以用一个"微正则系综"来代表，即给定能量表面上的所有点都有同样的概率时，系统是处于平衡态的。这意味着一个系统要向平衡态演变，能量必须是在系统演变过程中惟一守恒的量。它必须是惟一的"不变量"。无论初始条件是什么，系统的演变必须使它能达到给定能量表面上的所有点。可是对于一个可积系统来说，能量远不是惟一的不变量。事实上，由于每个广义动量都保持不变，所以有多少个自由度，就有多少个不变量。于是我们不得不指望，这样的系统被"囚禁"在恒定能量表面的一个很小的"部分"之内，而这恒定能量表面是由所有这些不变量表面的相交组成的(见图33)。

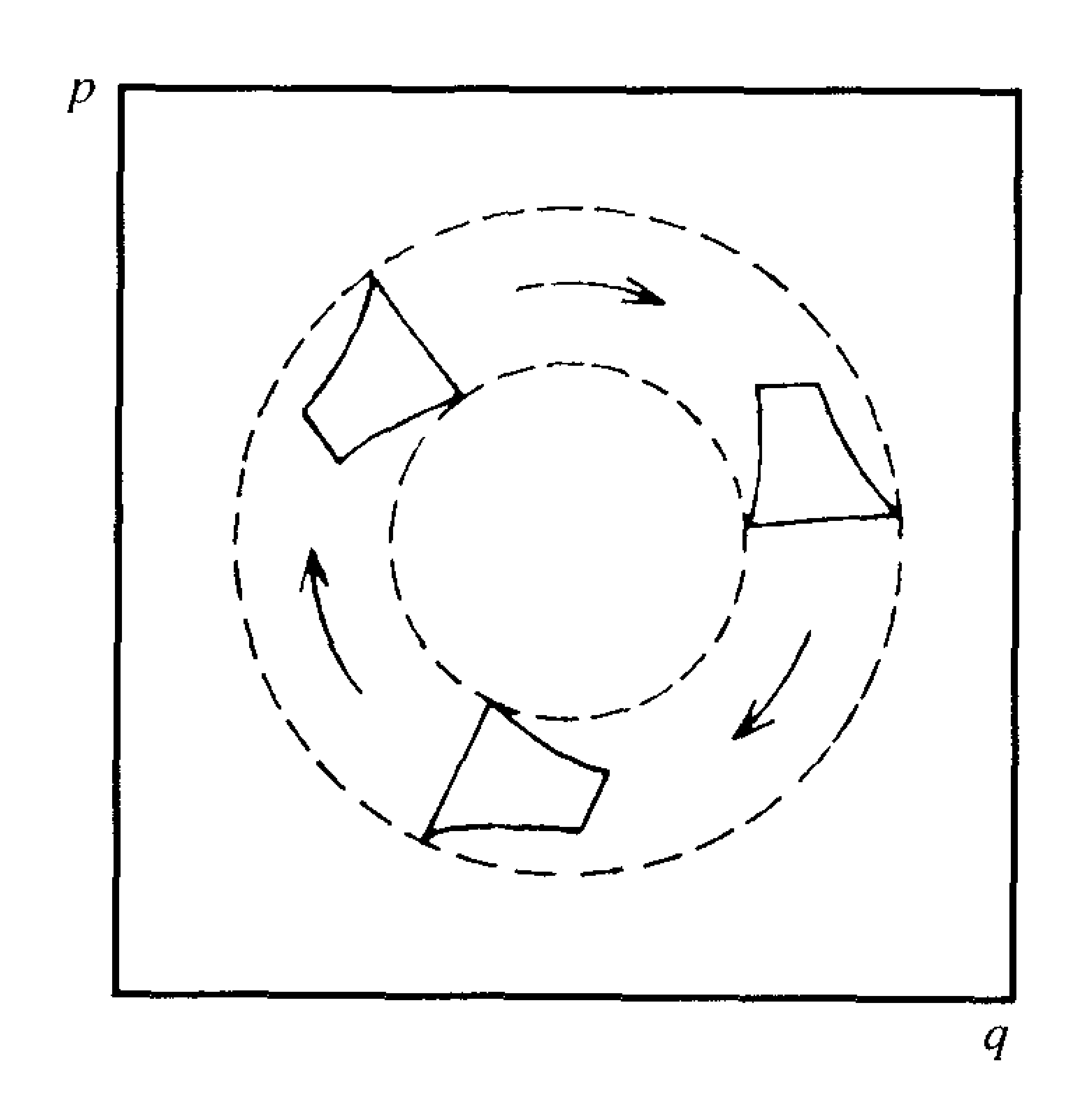


图33 相空间 p,q 内一个小格子的时间演变

小格子的"体积"和形状不随时间变化，而且相空间的大部分是该系统不能接近的。

为了避开这些困难，麦克斯韦和玻耳兹曼引进了一种全新的、类型大不相同的动力学系统。对这些系统而言，能量是惟一的不变量。这种系统被称为“遍历”系统(见图 34)。

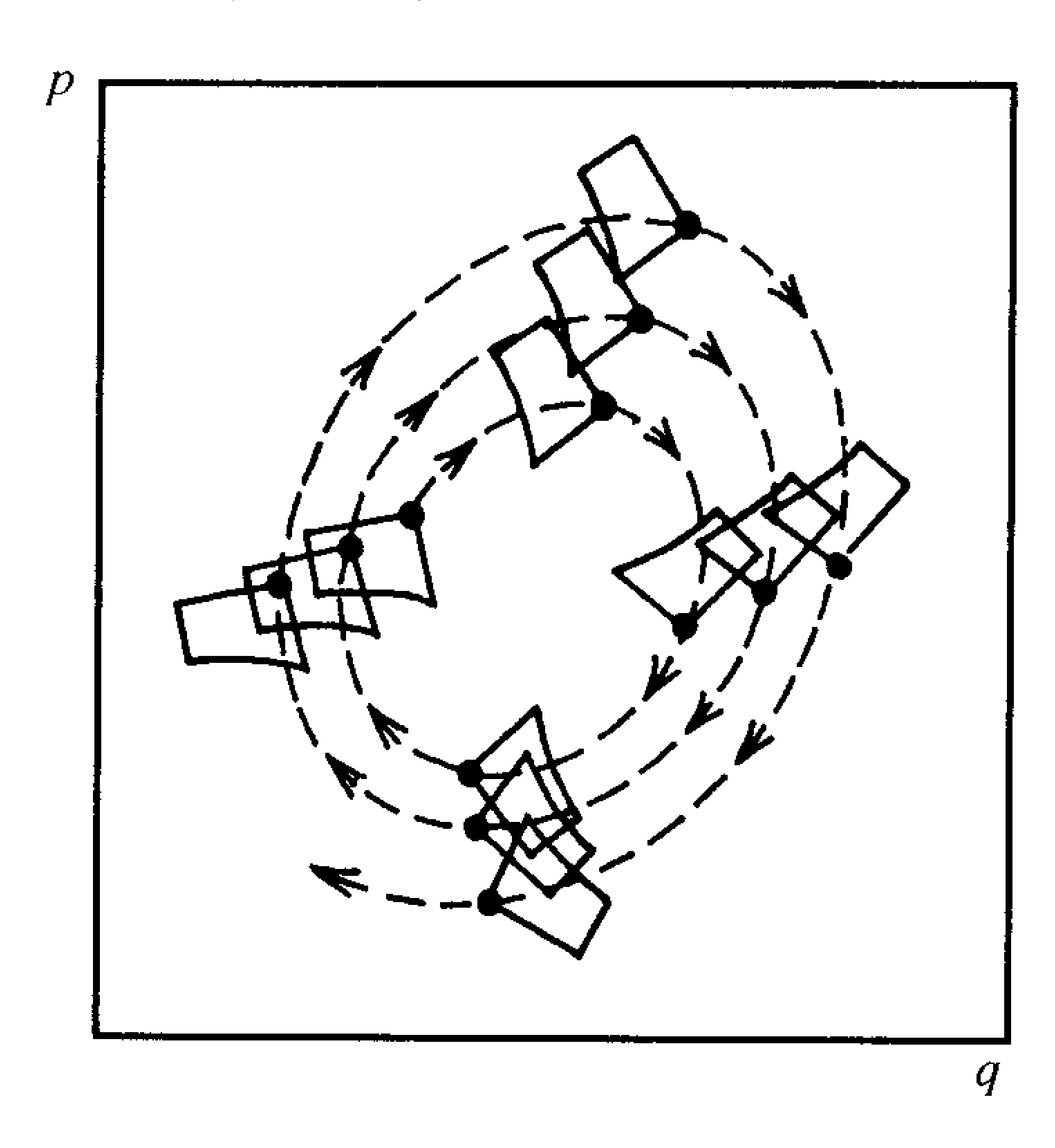


图 34　与遍历系统相应的一个小格子在相空间中的典型演变

随着时间的流逝，“体积”和形状保持不变，但小格子现在是沿着螺旋线穿过整个相空间。

伯克霍夫(Birchoff)、冯 · 诺伊曼、霍普夫(Hopf)、科尔莫戈罗夫(Kolmogoroff)和西奈(Sinai)以及其他许多人都对遍历系统的理论作出了重大贡献。如今，我们已经知道，有一大类一大类的动力学系统(虽然是非哈密顿的)是遍历系统。我们还知道，甚至比较简单的系统也可能有比遍历性更强的特性。对这些系统来说，相空间中的运动成为非常混沌的(不过总是保持一定体积，这体积符合在第七章中讲过的刘维方程)。

设我们对于初始条件的了解允许我们把一个系统定位于相空间的一个小格子中。在它的演变过程中，我们会看到这个初始的小格子扭绞曲折，像阿米巴虫那样向各个方向伸出“假足”，布下越来越细而扭绞的纤丝，直到最后侵占整个空间。什么示意图也无法对实际情况的复杂程度作出恰如其分的描述。确实，在一个混合系统的动态演变过程中，相

空间中任意靠近的两个点会朝向不同的方向。即使我们拥有许多关于这个系统的信息,以致由系统的代表点形成的初始格子非常之小,动态的演变也会使这个小格子变成真正的几何“怪物”——它把纤细的丝网铺满了整个相空间(参阅图 35)。

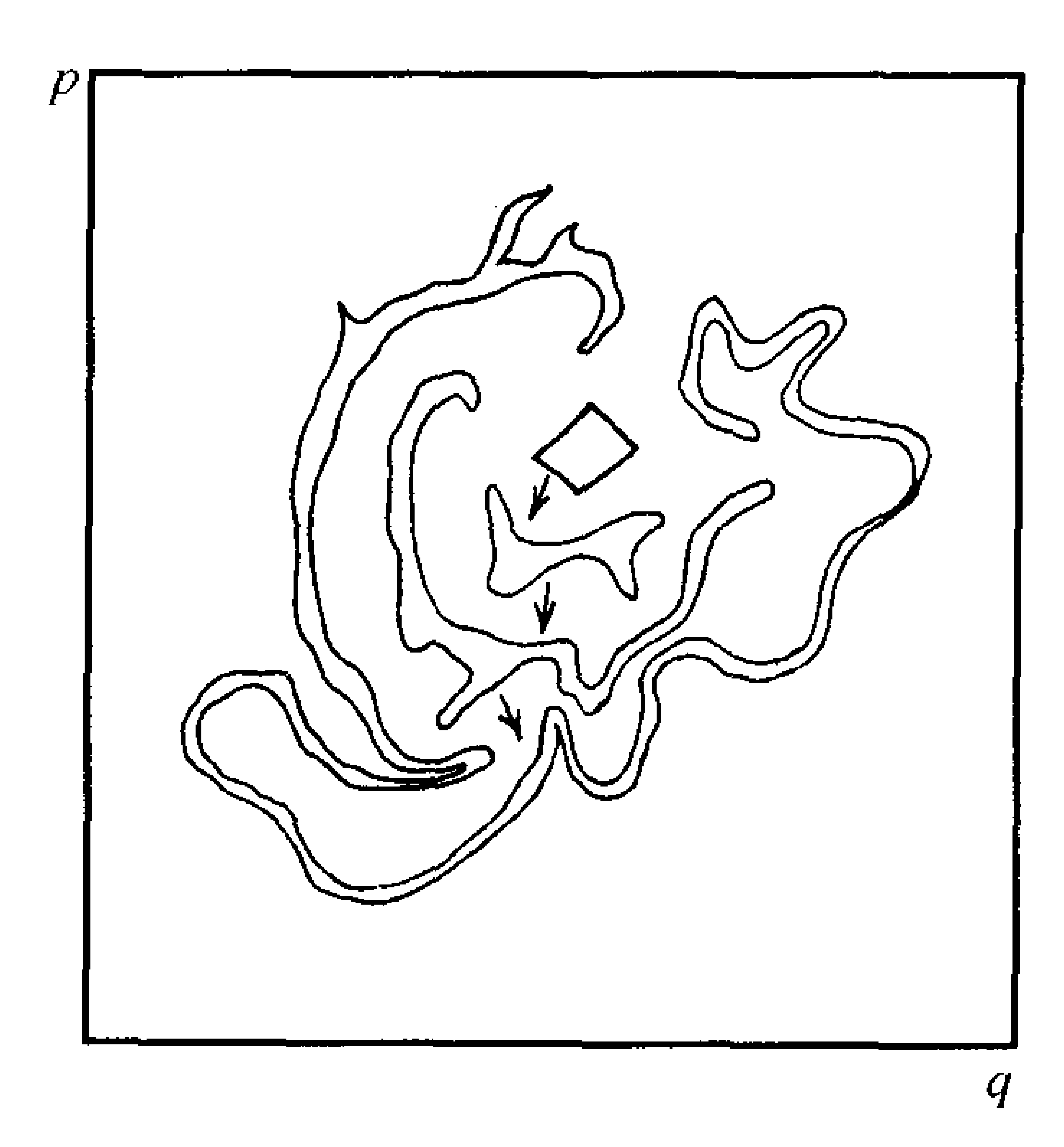


图 35 与“混合”系统相应的一个小格子在相空间中的典型演变

体积仍不变,但形状却在变:小格子逐步地布满整个相空间。

我们打算用几个简单的例子说明稳定系统与不稳定系统之间的区别。考虑一个二维的相空间,每隔一定的时间,我们用新坐标取代原来的坐标。水平轴上的新点是 $p-q$,而新的纵坐标是 p。图 36 表明当我们对一个正方形作这样的处理时会发生什么情况。

正方形发生了变形,但六次变换后我们又回到原来的正方形。系统是稳定的:相邻的点经变换后仍是相邻的点。而且它对应于一种循环的变形(经过六次操作之后,又呈现为原来的正方形)。

现在我们再来考虑两个非常不稳定系统的例子——第一个是数学的,第二个则明显地具有物理的关联。第一个系统包含的变换由于明显的原因被数学家们称为“面包师变换”。我们先取一个正方

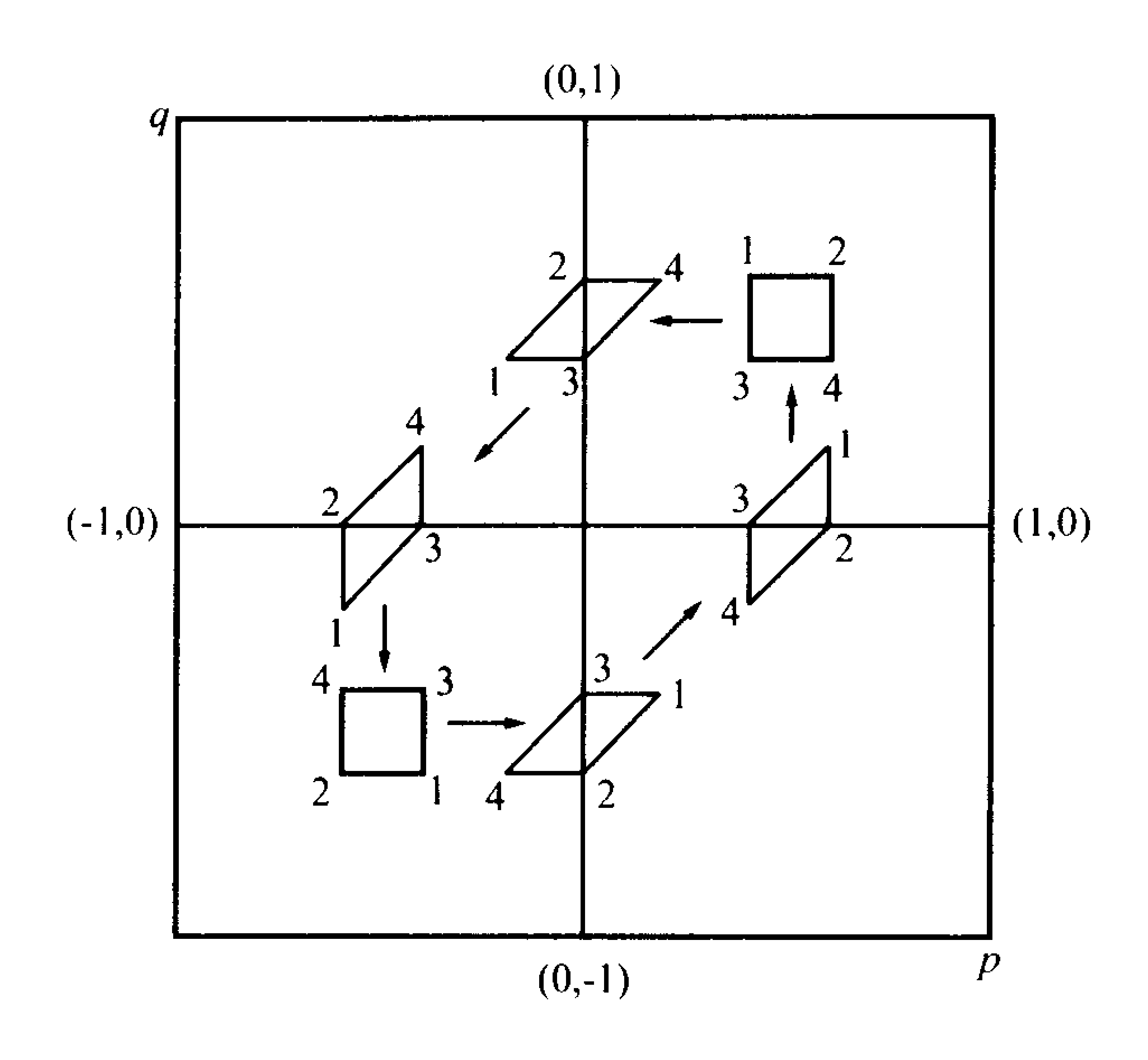


图 36 由离散变换造成的相空间中一个体积的变形

横坐标 p 变为 $p-q$，纵坐标 q 变为 p。变形是循环的，每变换六次就又恢复为初始的格子。

形，然后把它弄扁而成一个矩形，再把这矩形的一半折叠在另一半之上，又形成一个正方形。这一组操作如图 37 所示，且可以重复任意多次。

每次正方形的表面被打破并重新分布。在这里，正方形对应着相空间。面包师变换把每个点都变成确定的新点。虽然以这种方式得到的一系列点都是“决定论”的，但系统还是表现出不可约化地统计学的方面。比如我们看一个系统，它的初始条件是正方形的区域 A 由代表点均匀地填充。我们可以证明，将上述变换重复足够次数之后，这个小格子(无论它的大小和位置如何)将会被打破成碎块(见图 38)。重要的是，任何区域(不论其大小如何)总是包含不同的发散到每个碎块去的轨道。尽管一个点的演变是可逆的、决定论的，但对无论怎样小的区域的描述基本上是统计学的。

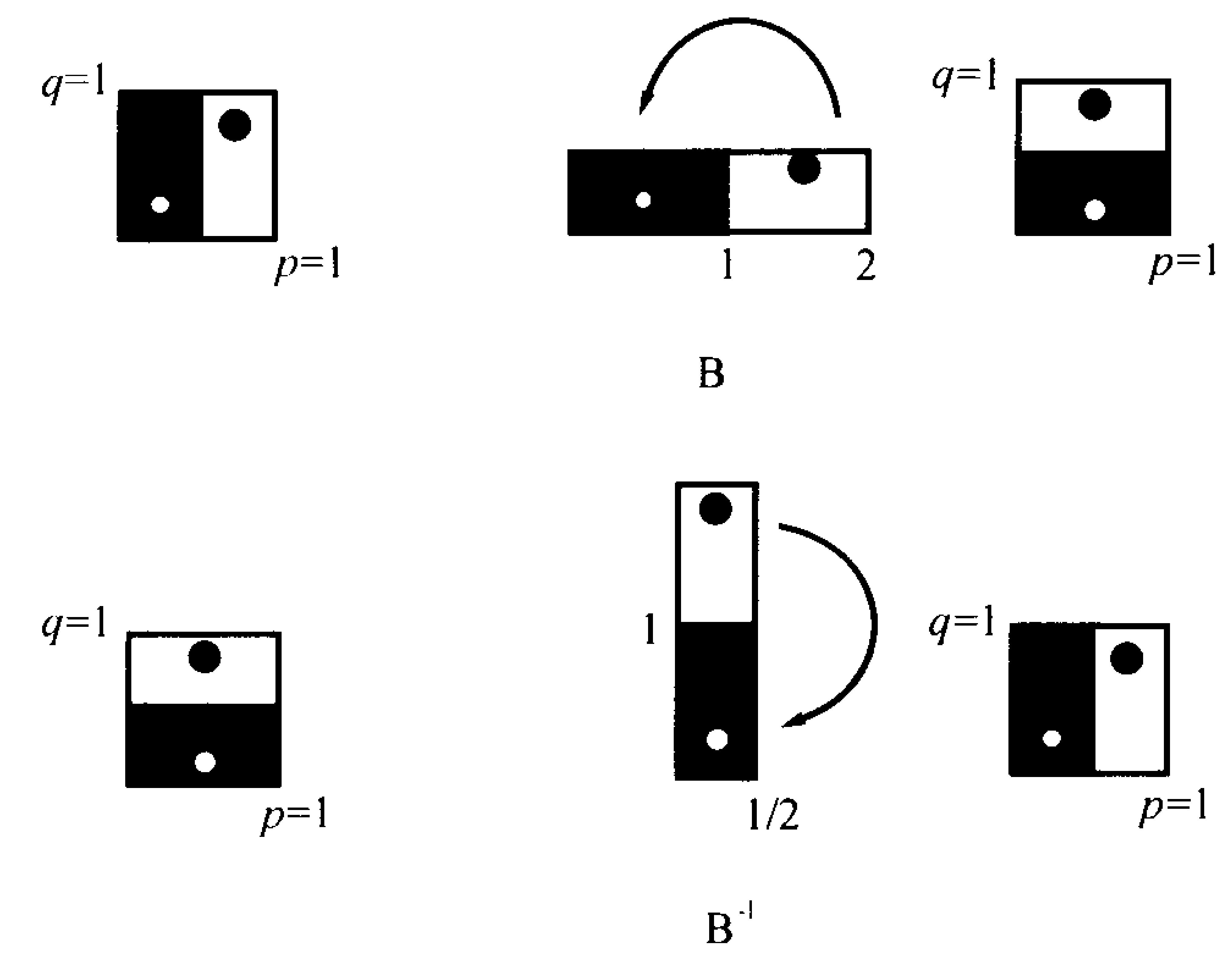


图 37 面包师变换(B)和它的逆变换(B^{-1})的实现

两个斑点的路径给出对变换的说明。

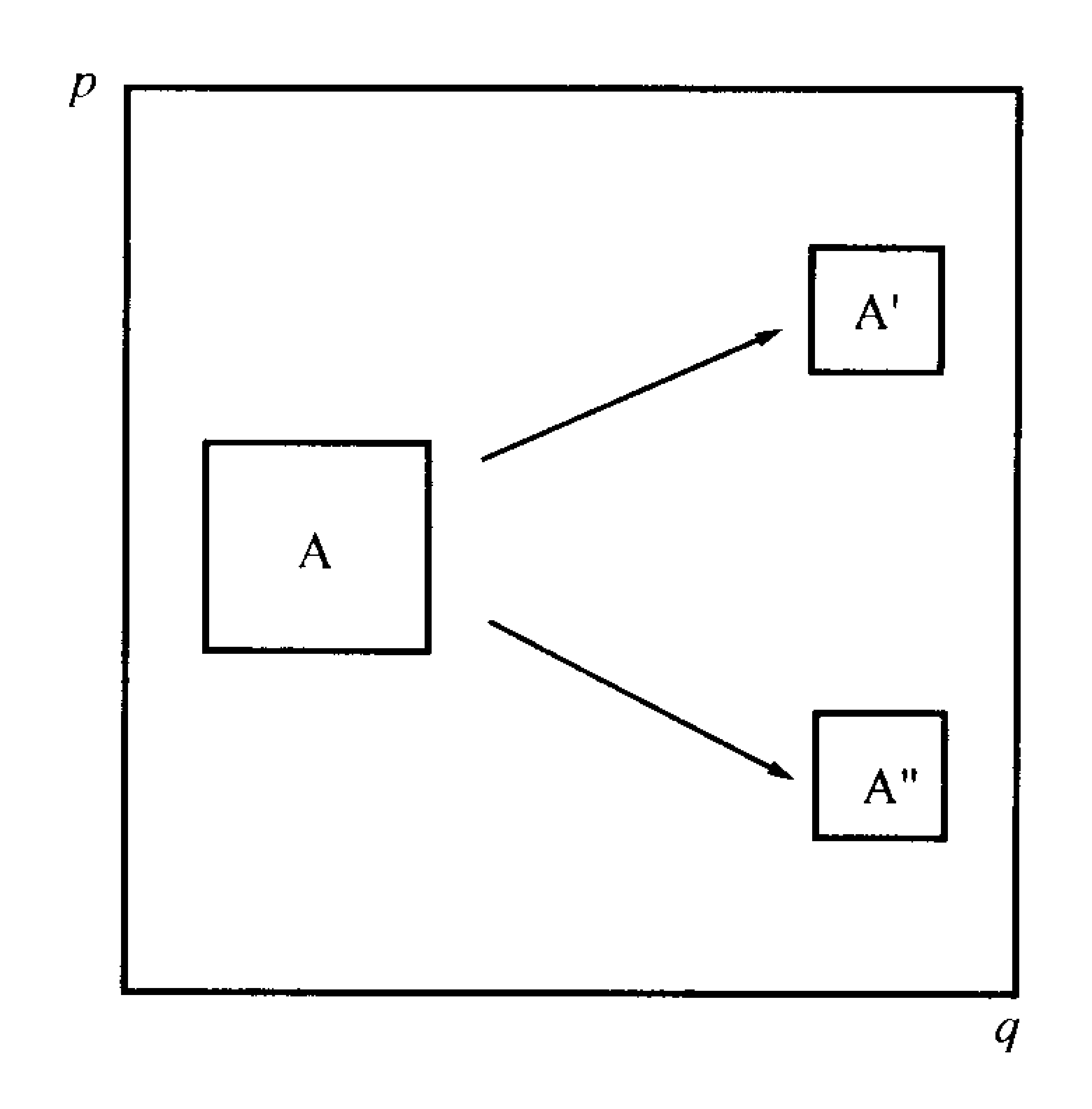


图 38 一个不稳定系统的时间演变过程

随着时间的流逝，区域 A 分成区域 A′ 和 A″，而 A′ 和 A″ 本身又继续被分裂。

一个类似的例子是硬球的散射。我们可以考虑从一组随机分布的大球上反弹回来的一个小球，大球假定是固定的。物理学家对这个模型以伟大的荷兰物理学家亨德里克·安东·洛伦兹的姓来命名，称为“洛伦兹模型”(参阅图 39)。

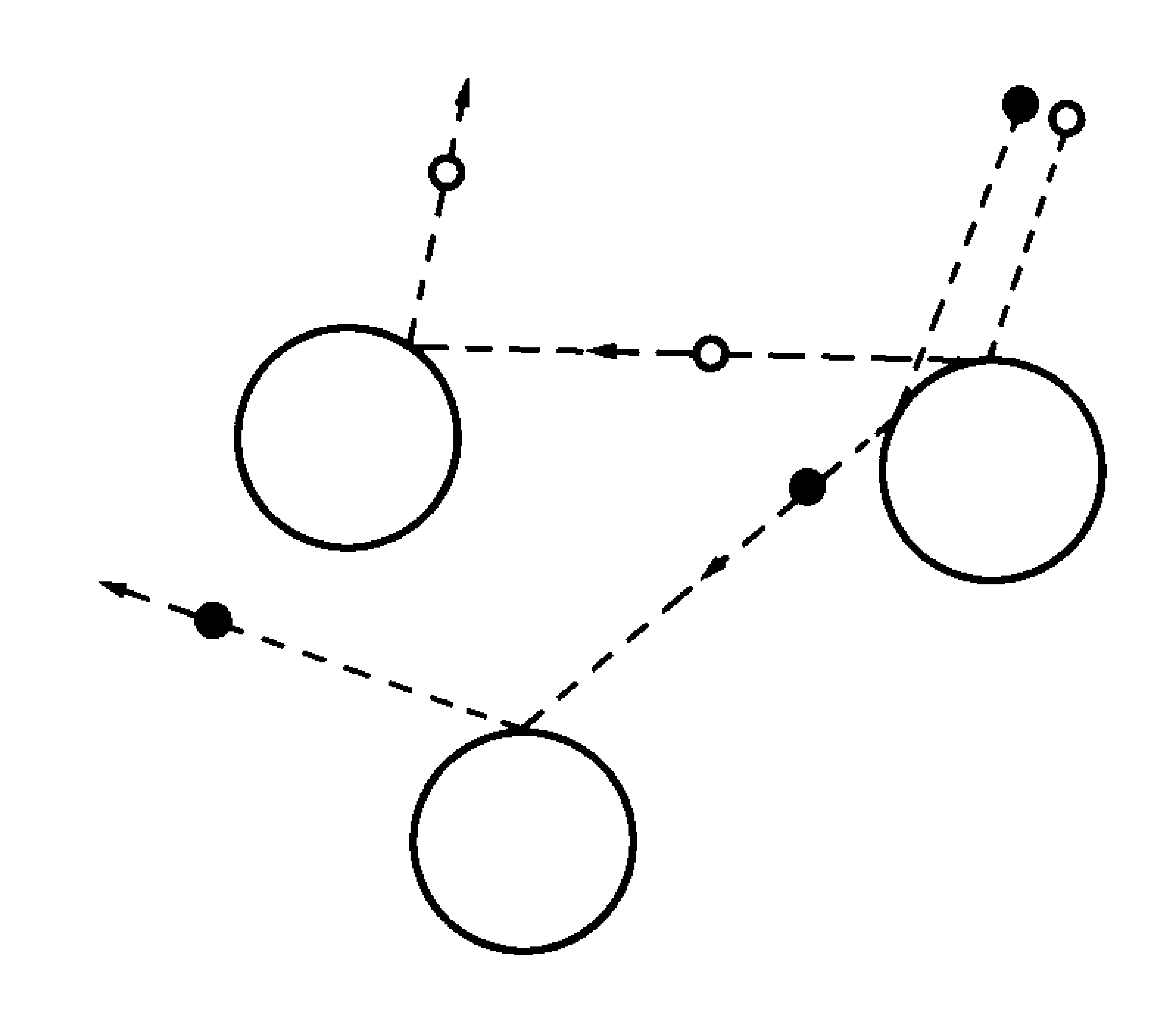


图 39 一个从大球上反弹回来的小球的轨道的不稳定性示意图

小球的初始位置有一点点不精确就会使我们无法预言在第一次碰撞后小球将打到哪一个大球上。

运动小球的轨道是确定的。但是，只要我们在初始条件中引进一个极小的不确定性，经过一系列的碰撞，这个不确定性就会变得很大。经过一段时间，在一给定的体积内找到小球的概率就变成均匀的了。无论变换次数有多少，我们再也回不到原来的状态了。

在上面这两个例子中，我们得出强不稳定的动力学系统。这一情形使人想起在热力学系统中出现的那种不稳定性(见第五章)。初始条件中任意小的区别都会被放大。结果是我们再也不能形成从相空间中的系综到各单个轨道的过渡。用系综去进行描述必须成为出发点。统计学概念不再仅仅是关于“客观真实性”的一个近似。面对着这些不稳定系统，拉普拉斯妖也和我们一样无能为力。

爱因斯坦说过一句名言："上帝不掷骰子。"按同样的精神，彭加勒说过，对于一个高级的数学家而言，没有什么位置是留给概率的。但正是彭加勒自己勾画出了通向这个问题的答案的路径。他注意到，当我们掷骰子和使用概率计算方法时，并非意味着我们假定动力学是错误的。它意味着某些相当不同的东西。我们使用概率的概念，是因为对应于初始条件的每一差别(当然是很小的)，有着同样"多"条轨道通向骰子的每一面。这正是不稳定动力学系统所发生的情形。上帝如果愿意，他可以计算一个不稳定动力学世界中的轨道。他会得到像我们经过概率计算所得到的同样的结果。当然，如果他使用他那绝对的智慧的话，是会免除一切随机性的。

总之，在不稳定性和概率之间有着密切的关系。这是很重要的一点，我们现在就来加以讨论。

5 从随机性到不可逆性

设有一个接一个的正方形，我们对之施行面包师变换，如图40所示。阴影区域可以想象为充满了墨水，非阴影区域则是充满了水。在0时刻的情形可以称为"母划分"。从这个划分出发，如果我们向未来发展，就可以形成一系列水平划分；如果向过去发展，就可以形成一系列垂直划分。这些都是基本划分。墨水在正方形中的任意分布可以在形式上写成是这些基本划分的叠加。对每个基本划分，我们都可以联系上一个"内部"时间*，这个时间简单说来就是从"母划分"开始到所考虑的这个划分为止的过程中我们必须实行的面包师变换的数目。所以这种类型的系统似乎允许有一种"内部年龄"。

---

* 要注意，这个内部时间(我们用 T 表示)事实上就是一个算符，就像在量子力学中引进的那些算符一样(见第七章)。确实，正方形的一个任意划分并没有一个很确定的时间，而只有一个"平均"时间，这平均时间与形成该划分的那些基本划分的叠加相对应。

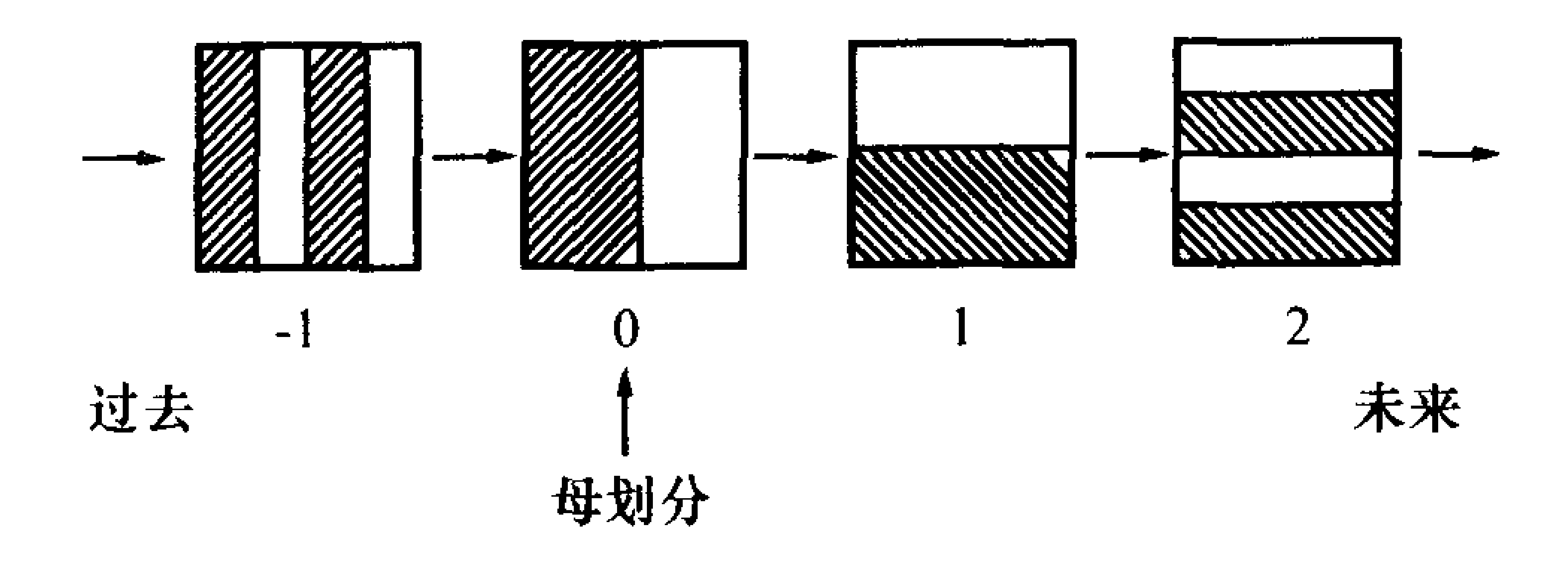


图 40 在 0 时刻从“母划分”开始(见正文),我们重复实行面包师变换

这样,就产生了水平条纹。类似地向过去演变,我们得到垂直条纹。

内部时间 T 取决于系统的整体拓扑,所以与通常的机械时间大不相同。我们甚至可以说到“空间计时”,这接近于近年来由地理学家们提出的想法——他们引进了“年代地理学”的概念。当我们观看一个城市或一个风景区的结构时,会看到时间元素并存着和相互作用着。巴西利亚或者庞贝可能就相当于某个确定的内部年龄,有点类似于面包师变换中的某一个基本划分。相反,现代罗马的建筑物产生于各个完全不同的年代,它就对应于一个平均时间,恰似一个任意划分可以被分解为若干对应于不同内部时间的元素。

让我们再来看图 40。如果我们走向遥远的未来,会发生什么情形呢?水平的墨水带将越来越密。无论我们测量的精度是多少,经过一段时间我们总会得出结论:墨水已经均匀地分布在整个体积内了。因此,可以把这种趋向“平衡”的方式勾画成像在第八章中讨论过的马尔可夫链那样的一种随机过程,就不足为奇了。这种情况最近已经以完全的数学严谨性描述出来了,不过其结果对我们来说似乎是相当自然的。随着时间的推移,墨水的分布达到平衡,正如在第八章中讨论过的罐子实验里那些小球的分布一样。可是,当我们再次从 0 时刻的母划分开始,向过去观察,也会看到同样的现象。现在墨水是沿着越来越小的垂直片段分布,而且只要向过去发展得足够遥远,我们就会发现墨水也是达到均匀分布。所以我们可以得出结论:也能够用马尔可夫链来模拟这个过

程，但现在是朝向过去。我们看到，从不稳定的动力学过程中可以得到两个马尔可夫链，一个在未来达到平衡，一个在过去达到平衡。

我们相信这是使人十分感兴趣的结论，并乐于对此作出评论。内部时间向我们提供了一个新的“非局域”的描述。

当我们知道系统的“年龄”(即相应的划分)时，仍然可以不把它与一个确定的局部轨道联系起来。

我们只知道这个系统在一个阴影区域中(图 40)。类似地，如果说我们知道与该系统中某点相对应的一些精确的初始条件，我们并不知道它所属的那个划分，不知道系统的年龄。所以对这样的系统，我们知道两种互补的描述，这情况有点使我们回想起第七章中讨论量子力学时遇到的那种情形。

由于这另一种新的描述即非局域描述的存在，使我们能从动力学过渡到概率论。我们把可能被这样描述的系统叫做“内在随机系统”。

在经典的决定论系统中，我们可以在相当简并的意义上使用从一个点到另一个点的转移概率。如果这两点都在同一条动力学轨道上，则转移概率为 1，否则为 0。

反之，在真正的概率论中，我们需要的转移概率是 0 到 1 之间的正数。这怎么可能呢?我们在这里明显地看到对概率论的主观主义观点和客观解释之间存在的矛盾。主观主义的解释对应着的情况是不知道个别具体的轨道。而概率性(最终还有与它密切相关的不可逆性)则正是从我们的无知产生的。但幸运的是，还有另一个客观的解释：概率性是作为动力学的另一种描述、一种发生在强不稳定动力学系统中的非局域描述的结果而出现的。

这里，可以说概率性变成从动力学内部生成的一种客观性质，它表达出动力学系统的基本结构。我们已强调过玻耳兹曼的基本发现的重

要性，这就是熵和概率之间的关系。对于内在随机系统来说，概率的概念获得了动力学的含义。现在我们必须从内在随机系统向不可逆系统过渡。我们已经看到，从不稳定动力学系统可以得出两种马尔可夫链。

我们可以按不同方式去看这种二元性。设有一个分布集中在一条线上(而不是分布在一个面上)。这条线可以是垂直的，也可以是水平的。我们来看一下当对这条线实行走向未来的面包师变换时，将会发生什么情况。结果表示在图41中。垂直的线被逐次截成短段，最后，在遥远的未来化作一点。相反，水平的线则被复制，并在遥远的未来均匀地“覆盖”整个表面。显然，如果我们走向过去，情形将正好相反。由于容易了解的理由，把垂直线称为收缩纤维，把水平线称为膨胀纤维。

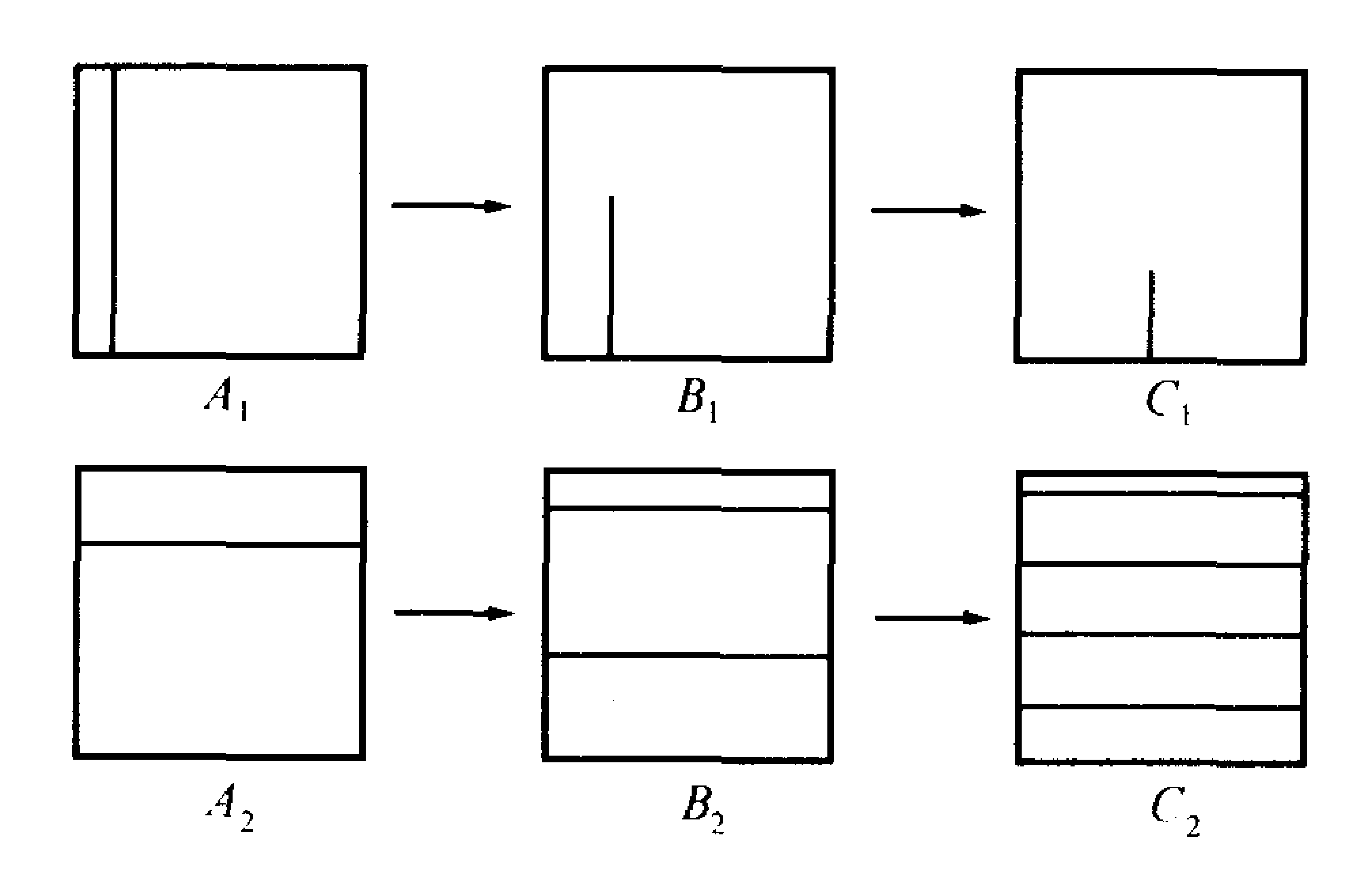


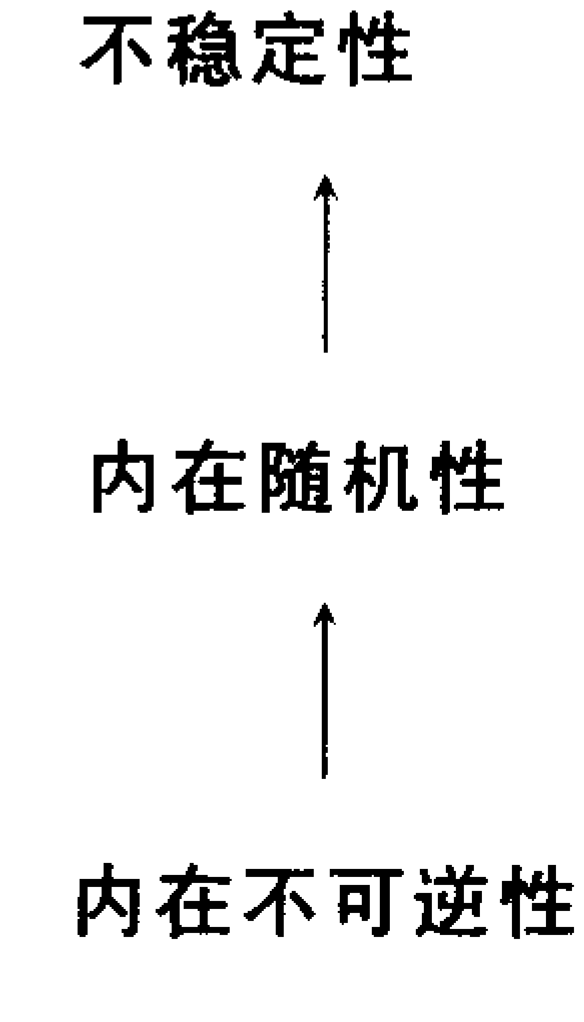
图41 面包师变换中的收缩纤维和膨胀纤维

随着时间的推移，收缩纤维 A_1 被截短(依次是 A_1, B_1, C_1)，而膨胀纤维被复制(依次是 A_2, B_2, C_2)。

现在我们看到的是和分叉理论的完全的类比。一个收缩纤维和一个膨胀纤维对应着动力学的两种实现，每种都包含对称破缺，且是成对出现的。收缩纤维对应着在遥远的过去达到的平衡，膨胀纤维则对应着在遥远的未来达到的平衡。所以我们有指向相反时间方向的两个马尔可夫链。

现在我们必须完成从内在随机系统向内在不可逆系统的过渡。为此我们必须更精确地弄明白收缩纤维与膨胀纤维之间的区别。我们已经看到，另一个像面包师变换那样不稳定的系统能够描述硬球的散射。这里的收缩纤维与膨胀纤维有着简单的物理解释。一个收缩纤维对应着那些在遥远的过去速度呈随机分布而在遥远的未来呈平行状态的硬球组合。一个膨胀纤维则对应着相反的状态，即速度由平行开始发展到随机分布。所以它们的区别非常类似于波普尔所举的例子中入射波与出射波之间的区别。排除收缩纤维出现的可能性就相当于这样的实验事实：无论实验家多么灵巧，他永远也不可能将系统控制得使它在经过任意次碰撞后产生出平行的速度来。一旦排除了收缩纤维，就只剩下已引进的两种可能的马尔可夫链中的一种了。换句话说就是，第二定律成了初始条件的一种选择原则。只有那些在未来能达到平衡的初始条件被保留下来。

显然，这个选择原则的有效性由动力学保持着。在面包师变换的例子中很容易看出，收缩纤维在任何时候都仍然是收缩纤维，膨胀纤维也是这样。通过抑制这两种马尔可夫链中的一种，我们就能够从一个内在随机系统过渡到一个内在不可逆系统。在不可逆性的描述中，我们发现有三个基本要素：



内在不可逆性是最强的特性：它隐含着随机性和不稳定性。

这个结论怎样和动力学相容呢?正如我们已经看到的那样,在动力学中“信息”是被保存的,而在马尔可夫链中信息被丢失了(因此熵是增大的;见第八章)。但是并没有矛盾;当我们从面包师变换的动力学描述进到热力学描述时,必须修改我们的分布函数;我们说熵增大的时候所考虑的“对象”与动力学中考虑的不一样。新的分布函数 $\hat{\rho}$ 对应于动力学系统的一个内在时间定向的描述。本书不可能详细叙述这个变换的数学方面。我们只强调一点,它必是非正则的(见第二章)。我们必须放弃通常的动力学描述,才能达到热力学描述。

特别值得注意的是,存在着上述这种变换,结果使我们现在能把动力学与热力学统一起来,把存在的物理学和演化的物理学统一起来。在本章的后面部分以及结论一章中,我们还要再来讨论这些新的热力学对象。现在只强调一下,在平衡态,只要熵达到最大值,这些对象肯定是在随机地行动着。

下述一点似乎也相当引人注意,即不稳定性把不可削减的统计学特点引入到我们的描述中,而不可逆性可以说就是从不稳定性中产生出来的。确实,在决定论的世界(其中未来和过去都包含在现在之中)里,时间之矢能意味着什么呢?正是由于未来并不包含在现在之中,而我们是从现在向未来发展的,所以时间之矢与从现在到未来的过渡相联系。我们相信,这个出自随机性的不可逆性的构成有许多后果,它们超出了科学本身,我们将在结论一章中再来讨论它们。我们先来弄清第二定律所允许的态和所禁止的态之间的区别。

6 熵 垒

时间以单一方向流动着,从过去走向未来。我们不可能操纵时间,不可能到过去中去遨游。从《一千零一夜》到H·G·威尔斯的《时间机

器》,漫游时间这个题材一直吸引着作家们。在当代,纳博科夫(Nabokov)的短篇小说《看看哈里昆!》(*Look at the Harlequins !*)描述了一个讲故事的人的烦恼,他发现他自己无法从一个空间方向切换到另一个方向,就像我们无法"旋转时间"一样。李约瑟在《中国科学技术史》(*Science and Civilization in China*)一书的第五卷中,描述了中国古代炼金术士的梦想:他们的最高目标不是设法把金属变成金子,而是操纵时间,以便通过从根本上把自然衰老过程减慢下来而达到长生不老。现在我们已经能更好地理解为什么像纳博科夫表达的那样不能"旋转时间"了。

无限的熵垒把可能存在的初始条件与不允许的初始条件分隔开。由于这个壁垒是无限的,所以技术的进步永远也不可能克服它。我们不得不放弃有朝一日能到自己的过去去漫游一番的希望。这情况有点类似于光速给出的那道壁垒。技术的进步能使我们越来越接近光速,但是从当今的物理学观点看,我们永远无法超越光速。

为了弄清这个壁垒的由来,让我们还是再看一看出现在马尔可夫链理论中的$\mathscr{H}$量的表达式(见第八章)。对每一种分布,我们都能够联系上一个数——$\mathscr{H}$的对应值。可以说每种分布都对应着一个确定的信息容量。信息容量越高,实现其相应的状态就越困难。这里我们希望说明的就是:第二定律所禁止的初始分布具有无限的信息容量。这就是为什么我们既不能实现它们也无法在自然界中找到它们的原因。

我们先来回顾一下第八章中给出的$\mathscr{H}$的含义。我们必须把有关的相空间再分割成一些小段或小盒子。每个小盒子 k 对应着一个平衡时的概率 $P_{eqm}(k)$和一个非平衡时的概率 $P(k,t)$。

$\mathscr{H}$量是对 $P(k,t)$与 $P_{eqm}(k)$之间差别的一种度量。当平衡时,这两者的差别不存在了,$\mathscr{H}$量也就变为 0。所以为了比较面包师变换和马尔可

夫链，就必须更精确地对小盒子作相应的选择。设我们考虑在时刻2时的一个系统(见图40)，并设它是在 t_i 时刻起始的。于是，我们的动力学理论的一个结论就是，这些小盒子对应着在 t_i 时刻与时刻2之间的划分的所有可能的交。如果我们现在考虑图40，就会看出，当 t_i 朝过去后退时，小盒子会稳定地变得越来越薄，因为我们必须引进越来越多的垂直分割。这情况表示在图42的B列中，图中从上到下有 t_i=1，0，-1，最下面是 t_i=-2。确实可以看出，按这个方法，小盒子的数目从4增加到32。

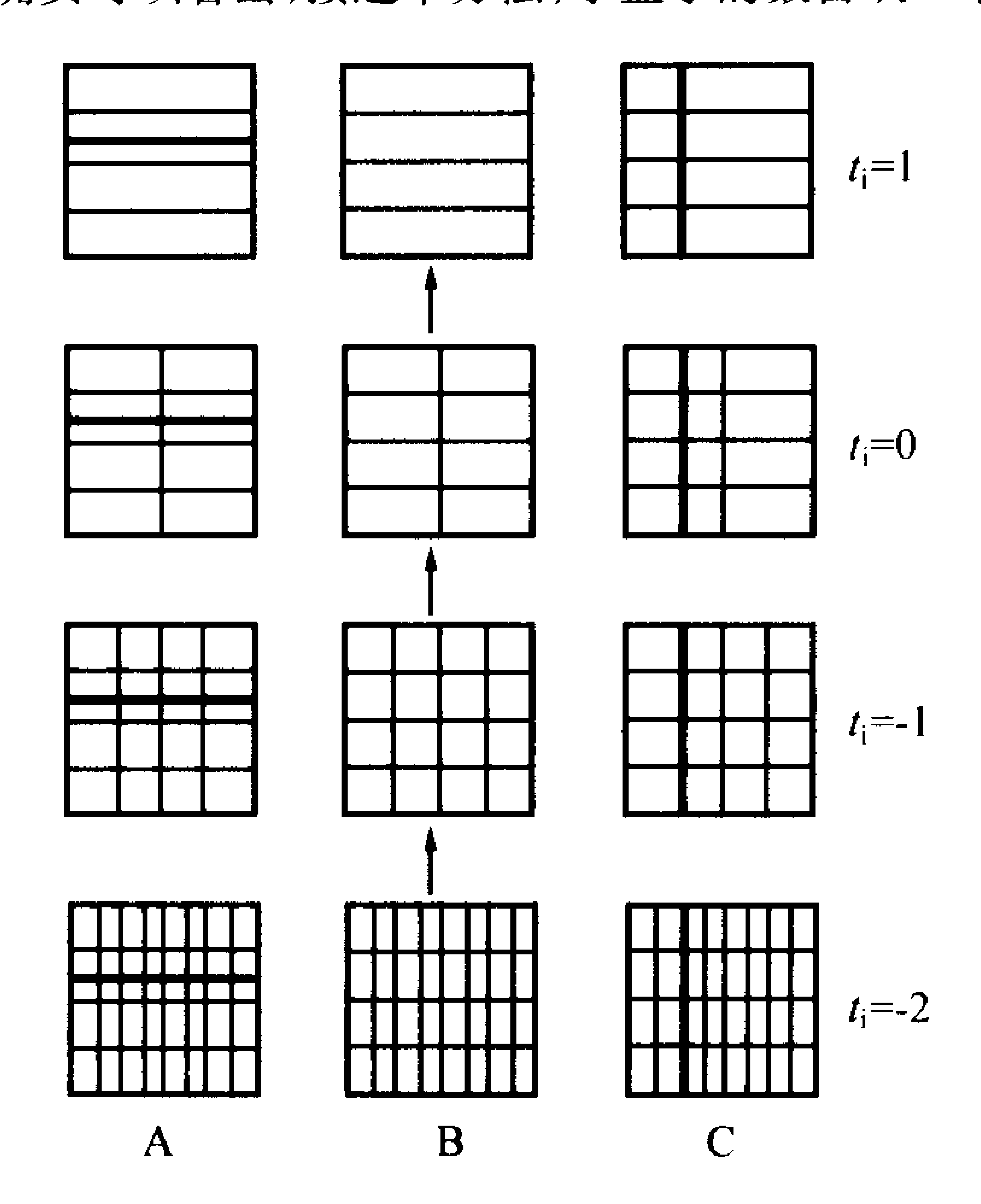


图42 膨胀纤维(A列)和收缩纤维(C列)穿过不同数目的分割面包师变换相空间的小盒子

所给的一列上的所有"正方形"都是相对于同样的时刻 t =2，而分割每个正方形的小盒子的数目则取决于系统的初始时间 t_i。

一旦有了这些小盒子，我们就可以对每个盒子比较平衡与非平衡分布。在当前情况下，所谓非平衡分布不是一个膨胀纤维(图中A列)就是一个收缩纤维(C列)。

要注意的重要一点是：当 t_i 朝过去倒退时，膨胀纤维占据的小盒子

数目在增加着，t_i =-1 时它占据 4 个，到 t_i =-2 时它就占据 8 个，如此等等。结果是，当我们应用第八章第 1 节给出的公式时，即使当 $t_i \to -\infty$ 时小盒子数目趋于无穷多，我们也只得到一个有限的结果。

反之，不论 t_i 是多少，收缩纤维总是定位在 4 个小盒子之内。结果是，当把 $\mathscr{H}$ 应用于收缩纤维，而 t_i 向过去倒退时，$\mathscr{H}$ 成为无穷大。

总之，一个动力学系统与马尔可夫链之间的区别就在于动力学系统中小盒子的数目是无穷的。正是这个事实导致了一个选择原则。只能是那些在无穷多个小盒子的极限情况下给出有限的信息或有限的 $\mathscr{H}$ 量的度量或概率才是可准备的或可观察的。这就排除了收缩纤维。基于同样的原因，我们必须也排除那些集中于一点的分布。与不稳定系统中的单个点相对应的初始条件又对应于无限的信息，因此是不可能实现或观察的。我们再一次看到第二定律作为一种选择原则而出现。

在经典模式中，初始条件是任意的。对于不稳定系统，已经不再是这样了。这里我们可以把每一个初始条件与一个信息容量联系在一起，而这个信息容量本身取决于系统的动力学(因为在面包师变换中我们使用小格子的逐次分割来计算信息容量)。初始条件与动力学不再是独立的了。第二定律作为一种选择原则对我们来说是如此重要，我们打算根据关联动力学给出另一种说明。

7 关联动力学

我们在第八章中曾简要地讨论了速度反演实验。设有一稀薄气体，我们来考察它随时间的演变。在时刻 t_0，我们使每个分子实行速度反演，于是气体将回到它的初始状态。我们已经注意到，为使气体回溯其过去，就必须有一些信息的存贮，这个存贮可以用粒子之间的“关

联"来描述。

首先考虑一个正对着靶(即一个重的、不动的粒子)射去的粒子云。图 43 表示了这种情况。在遥远的过去,粒子之间没有关联。现在,就像在第八章中提到过的,散射有两种效果。它使粒子散开(速度分布更加对称);此外,还产生被散射粒子与散射体之间的关联。通过实行速度反演(即引进一个球面镜),可以使这些关联变得很明显。图 44 就代表着这种情形(图中的波纹线代表着关联)。所以散射的作用可以表示如下:在正过程中,它使速度分布得更加对称,而且产生了关联;在反过程中,则是使速度分布得更少对称,而且使关联消失。可见,对关联的考虑引进了正、反过程的基本差别。

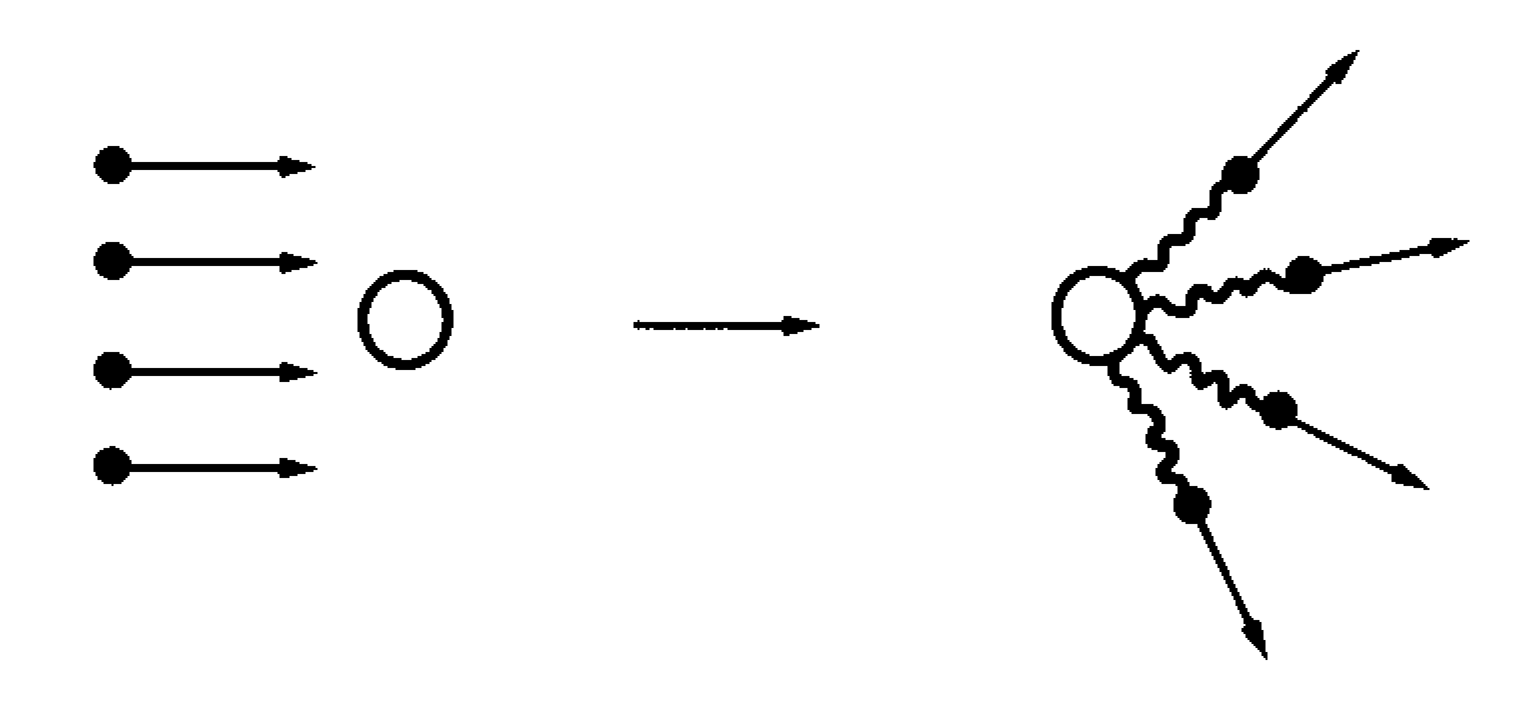


图 43　粒子的散射

起始时,所有粒子速度相同。碰撞之后,速度就不再一样了,而且被散射粒子与散射体之间有了关联(用波纹线表示)。

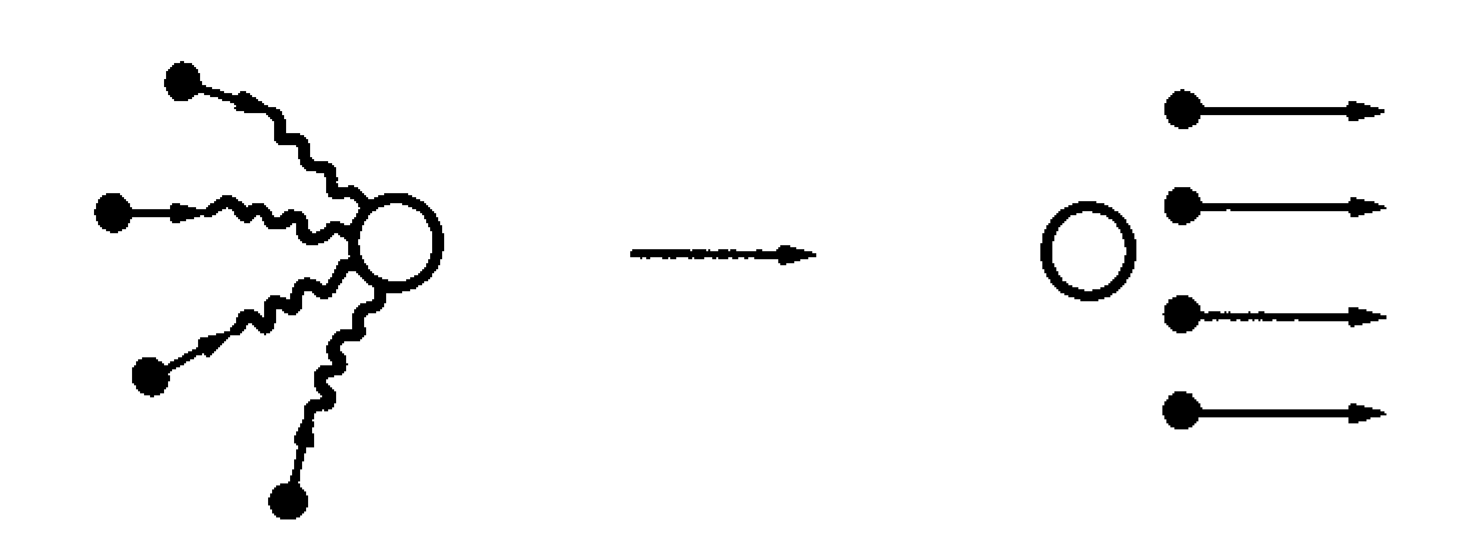


图 44　碰撞之后速度反演的结果

在新的"反"碰撞之后,关联被抑制,所有粒子又有了同样的速度。

我们可以把上述结论用于多体系统。同样可以考虑两种情形:在一种情形中,一些无关联的粒子进入且被散射,产生出有关联的粒子(见图 45)。在相反的情形中,进来的是有关联的粒子,经过碰撞,关联被破坏,

产生出无关联的粒子(见图 46)。

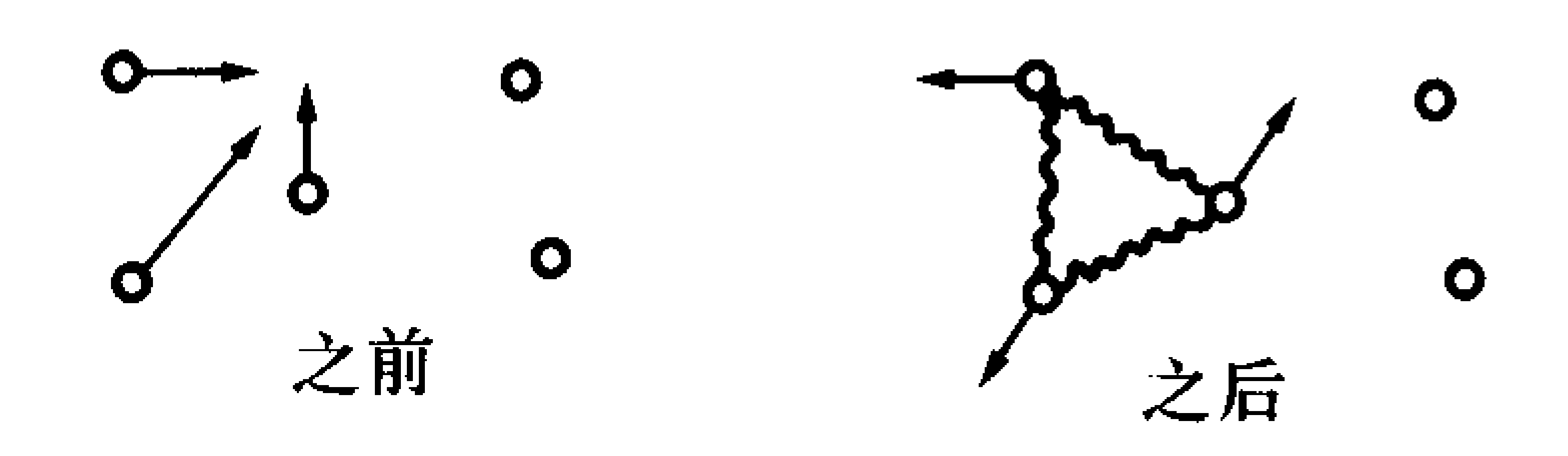


图 45 后碰撞关联的生成(用波纹线代表)

详见正文。

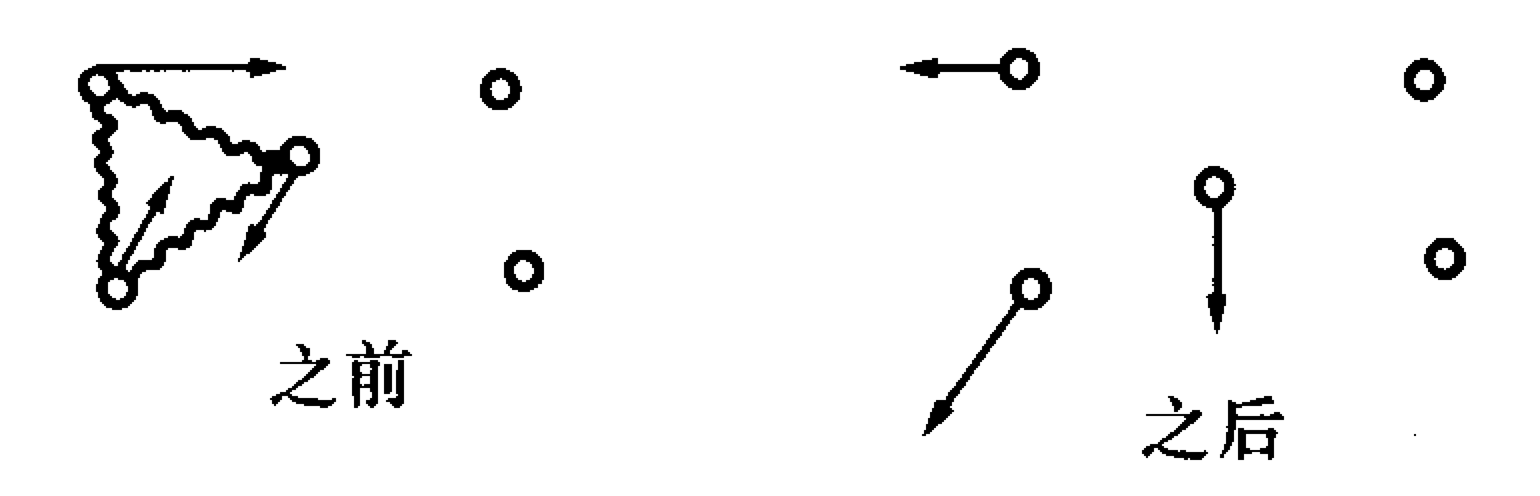


图 46 前碰撞关联(波纹线)经过碰撞而被破坏

在碰撞和关联的时间次序方面,这两种情形是不同的。在第一种情况下,我们有"后碰撞"关联。让我们先记住前碰撞关联和后碰撞关联之间的区别,再来看看速度反演实验。我们从 $t=0$ 开始,且初始条件对应于粒子间无关联的情况。在 $0 \to t_0$ 的这段时间里,我们有"正常"演变。碰撞使得速度分布更接近于麦克斯韦平衡分布。碰撞还生成粒子间的后碰撞关联。在时刻 t_0,经过速度反演之后,一个完全新的情况发生了。后碰撞关联现在转变为前碰撞关联。在 t_0 到 $2t_0$ 的时间间隔内,这些前碰撞关联又消失了,速度分布又变得更少对称,而且在时刻 $2t_0$,我们又回到了无关联的状态。因此,这个系统的历史有两个阶段。在第一阶段中,碰撞被转换成关联;在第二阶段中,关联又变回为碰撞。这两种类型的过程都是与动力学的定律相容的。而且正如我们在第八章中提到的那样,动力学所描述的总"信息量"保持不变。我们也已看到,在玻耳兹曼的描述中,从时刻 0 到 t_0 的演变对应着通常的$\mathscr{H}$量的减小,而从 t_0 到 $2t_0$,我们有一种反常的情形:$\mathscr{H}$量增大,熵则减小。于是我们就能够设计实验室的或计算机的实验,使得在这些实验中第二定律被违反了!在

$0 \to t_0$ 阶段中的不可逆性将受到 $t_0 \to 2t_0$ 阶段的“反不可逆性”的“补偿”。

这是非常不能使人满意的。如果我们像在面包师变换中那样走向一种新的“热力学表象”，使得用这种表象可以把动力学变成一个像马尔可夫链那样的概率过程，那么所有这些困难就都不存在了。我们还必须考虑到，速度反演不是一种“自然”过程；需要把“信息”从外部给予分子，以便使它们的速度得到反演。我们需要有一种麦克斯韦妖来实行这个速度反演，而麦克斯韦妖是有代价的。我们把(概率过程的)$\mathscr{H}$量表示为一个时间的函数。在图 47 中就是这样做的。与玻耳兹曼的方法不同，在这种方法中，关联的作用在$\mathscr{H}$的新定义中仍保留着。所以在速度反演点 t_0，$\mathscr{H}$量有个跳跃。这是由于我们突然生成了异常的前碰撞关联，而这个关联随后必将被破坏掉。这个跳跃就对应于我们所必须付出的熵或信息的代价。

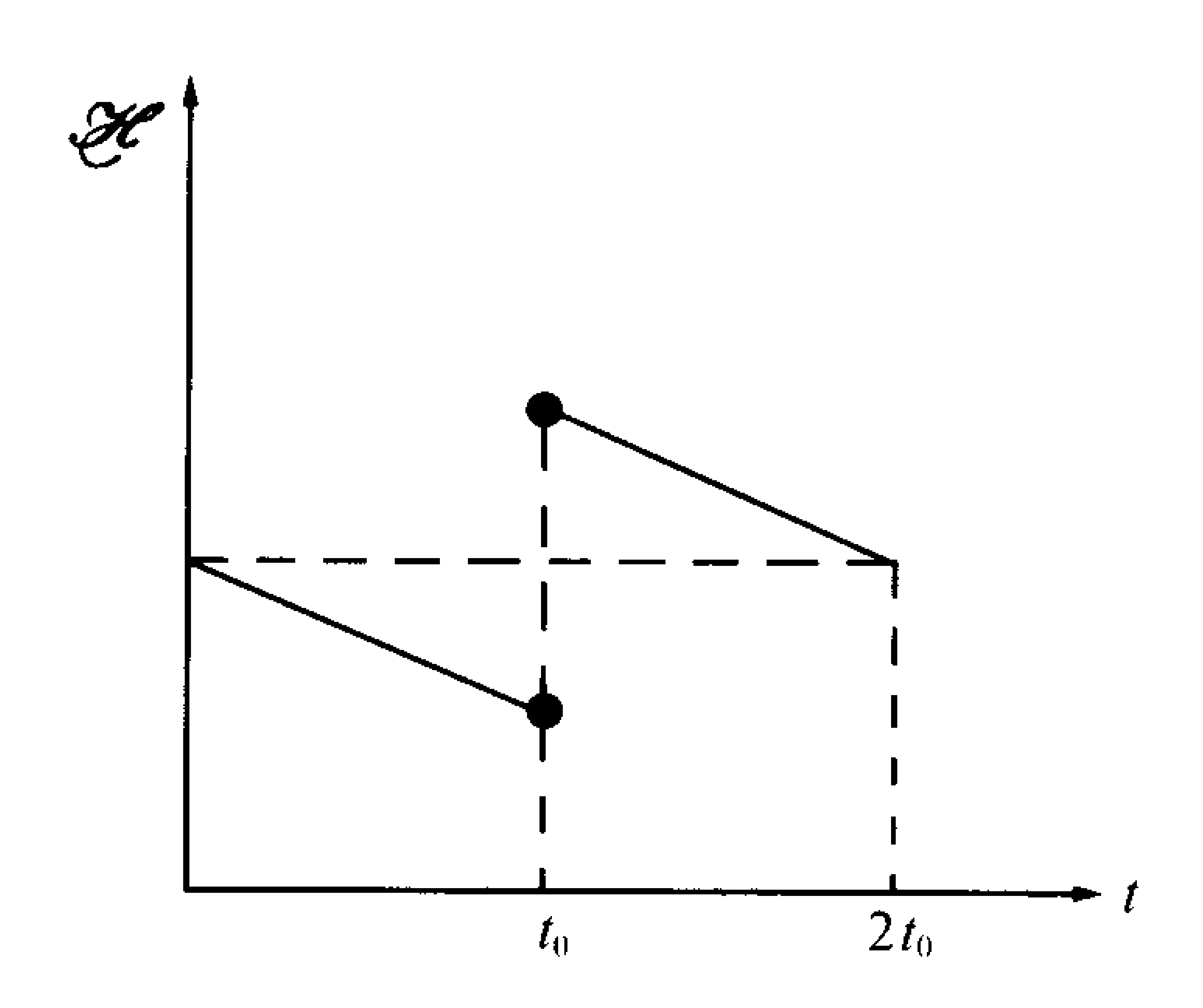


图 47 在速度反演实验中$\mathscr{H}$函数随时间的变化情况

在时刻 t_0，速度发生反演且$\mathscr{H}$出现间断。在时刻 $2t_0$，系统处于与时刻 0 相同的状态，$\mathscr{H}$量又恢复到它开始时所具有的值。在整个过程中(除时刻 t_0 外)，$\mathscr{H}$都是下降的。重要的是$\mathscr{H}$量在时刻 t_0 取两个不同的值(见正文)。

现在我们有了第二定律的一个可信的表象：在每一时刻，$\mathscr{H}$量都在减小(或者说熵都在增大)。只是在时刻 t_0 有一个例外：$\mathscr{H}$量向上跳

跃，而这对应于系统是开放的那个时刻。我们只能通过外来的作用使速度反演。

还有另外一个基本要点：在时刻 t_0，新的$\mathscr{H}$量有两个不同的值，一个相对于速度反演前的系统，一个相对于速度反演后的系统。这两种情形有着不同的熵。这类似于在面包师交换中当收缩纤维与膨胀纤维互为速度反演时所发生的情况。

设在实行速度反演之前我们等待一段充分长的时间，后碰撞关联就会有一个任意大的范围，为进行速度反演而付出的熵的代价就会太大。于是速度反演需要一个太高的熵作为代价，因而将被排除掉。在物理学上说起来，这意味着第二定律排除了持久的长程前碰撞关联。

这种与第二定律宏观描述的类比是很显著的。根据能量守恒的观点(见第四和第五章)，热和功起着同样的作用；而根据第二定律的观点却不再如此。简单地说就是，功是能量的一种更为相干的形式，总可以被转换成热；但相反的转换却不可能。碰撞与关联在微观层次上有着类似的差别。根据动力学观点，碰撞与关联起着等效的作用。碰撞引起关联的发生，而关联会破坏碰撞的效果。但是有一点基本的区别。我们能够控制碰撞并产生关联，但我们却不能以某种方式控制关联，使碰撞给系统带来的效果被破坏掉。正是这个基本的区别在动力学中被漏掉了，但却能被纳入热力学。注意，热力学在任何方面都不与动力学发生冲突。它是把一个补充的基本要素加到我们对物理世界的理解中去。

8　作为选择原则的熵

令人感到惊异的是，不可逆过程的微观理论与传统的宏观理论是那样地相似。在两种情况下，起初熵都具有某种负的意义。在宏观方面，

它禁止某些过程，比如热量从冷处流向热处的过程。在微观方面，它禁止某些种类的初始条件。被允许和被禁止的东西之间的区别始终由动力学定律维持着。正的方面恰是出自负的方面：熵的存在总是和它的概率解释在一起。不可逆性在某一宏观层次上不再像是通过一种奇迹而出现。宏观不可逆性只不过是使我们所在的那个宇宙的时间定向极化特性变得显而易见罢了。

正如我们反复强调过的，在自然界中存在着一些完全可以用经典力学或量子力学定律加以描述的系统，它们的行为是可逆的。但是，我们所感兴趣的绝大多数系统，包括所有的化学系统及所有的生物学系统，在宏观层次上都是时间定向的。这决不是一种“幻觉”，这表达出在微观层次上的一种破缺的时间对称性。不可逆性要么在所有层次上都是真实的，要么就在所有层次上都是不真实的。不可逆性不能通过某种奇迹而发生，也不会通过从一个层次到另一层次的过渡而出现。

我们也已注意到，不可逆性是另一些对称破缺的起点。例如，人们普遍承认，粒子与反粒子之间的区别只有在非平衡的世界中才能发生。这一点可以扩展到其他许多情形。不可逆性很可能通过选择适当的分叉而在螺旋空间对称的出现中也起作用。目前最活跃的研究课题之一就是如何把不可逆性“铭刻”到物质结构中去。

读者可能已经注意到，在导出微观不可逆性时，我们一直是集中于经典动力学。但是，关联的思想以及前碰撞关联和后碰撞关联的区别的思想也都适用于量子系统。比起经典系统来，量子系统的研究更为错综复杂。一个原因是经典力学与量子力学之间的区别。即使很小的经典系统(比如那些由几个硬球组成的系统)，也会呈现出内在不可逆性来。但在量子系统中，要想达到不可逆性就必须要有很大的系统才行，比如那些在液体、气体或在场论中实现的系统。对大系统的研究从数学上来说

显然是困难多了，这就是为什么我们这里不在这方面进行深入讨论的原因。但是在量子理论中，情形基本上仍是同样的。由于某种形式的量子不稳定性给波函数概念带来局限性，结果也开始了不可逆性。

此外，碰撞与关联的思想也可以用于量子理论。因此，像在经典理论中一样，第二定律不允许长程前碰撞关联的存在。

向概率过程的过渡引进了新的实体，而且正是用这种新的实体，使第二定律可以被理解为从有序向无序的一种演变。这是一个重要的结论。第二定律导致了一种新的物质概念。现在我们来描述这个概念。

9 活性物质

一旦我们把熵和一个动力学系统联系起来，就又回到了玻耳兹曼的概念：平衡态的概率最大。因此我们用来描述热力学演变过程的单元在平衡态时是以混沌的方式动作着的。反之，在近平衡态的条件下将出现关联和相干性。

我们终于得到了我们的主要结论之一：在所有层次上，无论是宏观物理学的层次，涨落的层次，或是微观层次，非平衡是有序之源。非平衡使"有序从混沌中产生"。但是正如我们已经提到的那样，有序(或无序)的概念比所想到的还要复杂。它仅在某些极限情形(比如在稀薄气体中)才具有符合玻耳兹曼的开创性工作的简单含义。

我们再来把用力和场对物理世界所作的动力学描述与热力学描述对比一下。如我们讲过的，我们能够设计一些计算机实验，在这些实验中，起初是随机分布的那些相互作用着的粒子构成一个点阵。动力学的解释是，通过粒子之间的力而出现有序。相反，热力学的解释是，当系统是孤立的时候，系统将达到无序，不过是以完全不同的单元(在此情况下

是包含大量粒子的集体模式)来表示的无序。对我们来说似乎值得做的是,重新引进我们在第六章中用过的新词语来定义一些新的单元,从这些新单元来看,系统在平衡时是不相干的。我们称它们是“睡子”,即梦游者,因为在平衡时它们互不理睬。它们中的每一个都可以任意复杂(请想一下某种酶的复杂结构里的分子),但在平衡时它们的复杂性被转向“内部”。而在一个分子内部又有着一个强电场,不过在稀薄气体中,对于其他的分子而言,这个电场可以忽略。

今日物理学中的主要课题之一就是基本粒子问题。但我们知道,基本粒子远远不是基本的。新的结构层次正在越来越高的能级上被发现。不过,基本粒子究竟是什么呢?行星中的地球是基本粒子吗?肯定不是,因为这个能量的一部分是在它与太阳、月亮和其他行星的相互作用中。基本粒子的概念需要一种“自治性”,按通常的概念很难描述它。以电子和光子为例,我们将面临进退两难的境地:要么没有确定的粒子(因为部分能量处于电子和质子之间),要么当我们能消除相互作用时,就又成为不相互作用的粒子了。即使我们知道如何做到这一点,看来这也是一个过分激进的步骤。电子吸收或发射光子。一种出路可能是走向过程的物理学。那时,单元或基本粒子会被定义为睡子,即在平衡时独立演变的实体。我们希望不久会有可行的实验来检验一下这个假设。如果那些和光子(或不稳定的基本粒子)相互作用的原子已经携带着一种表达自然界全局演变的时间之矢,那将是相当有吸引力的。

今天被广泛讨论的一个课题就是宇宙演化问题。在“大爆炸”的那个瞬间附近,这个世界怎么会那样地“有序”呢?不过,如果我们希望把宇宙演变理解为逐渐从有序向无序运动的话,这个有序还是必要的。

为了给出一个令人满意的答案,我们需要知道什么样的“睡子”能够适合于那些显示早期宇宙特征的温度和密度的极端条件。当然,热力

学是不能单独解决这些问题的，动力学也不能，甚至用动力学的最精巧的形式——场论也不行。这就是为什么说动力学与热力学的统一开创了新的视野的理由。

总之，自从一百五十年前热力学第二定律被表述时起，情况所发生的变化是惊人的。首先，原子论的观点看来与熵的概念相矛盾。玻耳兹曼试图拯救机械论世界观，其代价是把第二定律降为一种有很大实用价值却没有什么基本意义的概率陈述。我们不知道最终确切的解将是什么；但是在今天，情况根本不同了。物质不是被给出的，按当代的观点，它一定是用量子场的手段由某个更基本的概念构成的。在这个物质的构成中，热力学的概念(不可逆性，熵)具有一定的作用。

让我们概括一下这里已经完成的工作。在第一编和第二编中强调指出了第二定律(以及与之相关的不可逆性概念)在宏观系统层次上的核心作用。

我们在第三编中试图表明，现在我们能够超出宏观层次之外，并发现不可逆性的微观意义。

但是，这需要在我们表达物理学基本定律的方法上有一个根本的改变。仅当丢弃经典的观点时——如在充分不稳定系统的场合那样——我们才能谈论“内在随机性”和“内在不可逆性”。

正是对这样的系统，我们可以引进一种新的扩充的时间描述，即用算符时间 T 所进行的描述。像我们在面包师变换的例子中所表明的那样(第九章第 5 节)，这个算符具有作为本征函数的相空间的划分(见图 40)。

于是，我们得到这样一种情形，它非常容易使人联想起量子力学中的情形。我们确实有两种可能的描述。或者我们为自己给出相空间中的一个点，这时我们不知道它属于哪一个划分，因而也就不知道它的内部

年龄；或者我们知道它的内部年龄，但那时我们却只知道划分，而不知道该点的精确位置。

一旦我们引进了内部时间 T，我们就能用熵作为一种选择原则来从那种用分布函数 ρ 所做的初始描述走向一种新的描述，在这新的描述中，分布 $\hat{\rho}$ 具有一个满足热力学第二定律的内在的时间之矢。当函数 ρ 和 $\hat{\rho}$ 用算符时间 T 的本征函数加以扩展时，它们之间的基本差别就表现出来了(见第七章第3节)。在 ρ 中，所有的内部年龄(无论是从过去算起的，还是从未来算起的)都是对称地出现。反之，在 $\hat{\rho}$ 中，则过去与未来起着不同的作用。过去是被包括在其中的，而未来却仍是不肯定的。这就是时间之矢的含义。迷人之处在于，现在在初始条件与变化规律之间出现了一个关系。一个带有某时间之矢的态出自一个规律，该规律也带有某时间之矢，并且改变了这个态，但却保持着它的时间之矢。

我们主要地集中讨论了经典情形。但我们的分析同样适用于量子力学，那里的情况更为复杂，因为普朗克常数的存在已破坏了轨道的概念，于是也导出了一种相空间中的非局域化。所以在量子力学中，我们必须把量子的非局域化与不可逆性所产生的非局域化叠加起来。

正如我们在第七章中所强调的那样，本世纪物理学中的两大革命相当于在物理学的基本结构中把经典力学之外的两种不可能性并起来：一种是信号传播速度不可能大于光速，一种是不可能同时测量坐标和动量。

这第二个原理(它同样限制了我们控制物质的能力)也导致物理学基本定律结构方面的深刻变化，是并不奇怪的。

让我们用一句谨慎的话语来结束我们这本专著的这一部分。不可逆过程的现象学理论目前已经完全建立起来。反之，不可逆过程的基本

微观理论却还是相当新的。在修改本书校样的时候,正在准备一些实验以求验证这些观点。只要这些实验尚未完成，推测的成分是不可避免的。

结论：从地到天——自然界的再迷惑

在任何要把属于我们自然界的精神方面和物质方面的经验领域联结起来的企图当中，时间都占据着关键的地位。

A·S·爱丁顿

1 开放的科学

科学当然包括对自然界的操纵，但它也在试图理解自然，试图更深入地钻研那些曾被一代又一代人提出来的问题。其中的一个问题就像是几乎摆脱不了的主题，贯穿在本书的始终，如同它贯穿在科学与哲学史中一样。这就是存在与演化之间的关系问题，永恒与变化之间的关系问题。

我们已经提到过前苏格拉底的一些猜测：变化(有变化才有事物的生与灭)是由外界强加给某种惰性物质的吗?还是物质独立的内在活性的结果?必须要有一个外部推力吗?还是演化本来就是物质内所固有的呢？十七世纪的科学是在和那些自然存在物自发和自主组织的生物学模型的对立中兴起的。但它又面对着另一个基本对手。大自然本质上就是随机的吗？有序的行为只是原子及其不稳定结合体偶然碰撞的一种瞬时结果吗?

近代科学中魅力的主要源泉之一恰好就是这样一种感觉：认为它已经发现了在自然界变化的核心处的永恒规律，因而也就祓除了时间和演化这类“邪祟”。这种对自然秩序的发现产生了法国社会学家莱维-布鲁尔(Lévy-Bruhl)所说的那种智慧的安全感：

> 这种智慧的安全感是如此深地扎根于我们之中，以致我们从来也看不到它怎么可能被动摇。即使我们假设我们可能观察到某种看上去十分神秘的现象，我们也还是继续相信我们的无知只不过是暂时的，这现象肯定服从因果关系的总规律，这现象发生的原因迟早会被确定。我们周围的自然界是有序和有理性的，恰如人类的思维一样。我们每天的活动便隐含着对自然规律普适性的完全信赖。

这种对于自然界“理性”的信赖感现在已经被粉碎了，这部分地要归因于科学在我们时代里的吵吵闹闹的成长。正如我们在序言中所提到的，我们的自然观正在经历着根本性的变化，向着多重性、暂时性和复杂性的变化。其中某些变化在本书中已有论述。

我们过去一直在寻求能用永恒规律表达的那种包罗万象的普遍模式，但是我们却发现了时间、事件、演变着的粒子。我们也一直在寻求对称性，却由于发现了在各种层次(从基本粒子直到生物学和生态学)都存在着对称破缺过程而感到吃惊。我们在本书中已经讨论过动力学(它暗含着时间对称性)与热力学第二定律(在它那里时间是有方向的)之间的冲突。

一种新的统一正在显露出来：在所有层次上不可逆性都是有序的

源泉。不可逆性是使有序从混沌中产生的机制。但是我们的自然观怎么能在过去几十年这相对说来是较短的时间间隔里就发生如此根本性的转变呢？我们认为这表明智力结构在我们的实在的概念中起着重要的作用。玻尔在访问克伦堡城堡时与海森堡的谈话中很好地表达了这一点：

> 只要有人想象出哈姆雷特曾住在这里，这个城堡便发生变化，这不是很奇怪吗？作为科学家，我们确信一个城堡只是用石头砌成的，并赞叹建筑师是怎样把它们砌到一起的。石头、带着铜锈的绿房顶、礼拜堂里的木雕，构成了整个城堡。这一切当中没有任何东西能被哈姆雷特住过这里这样一个事实所改变，而它又确实被完全改变了。突然墙和壁垒说起不同的语言……然而，我们关于哈姆雷特所知道的一切就是在十三世纪的编年史中出现过他的名字……但是，人人都知道莎士比亚曾经让他提出的那些问题，让他去揭露的人性深度，因而他也必须在克伦堡这里有一席之地。

实在的意义这个问题是爱因斯坦与泰戈尔之间一场使人着迷的对话的中心议题。爱因斯坦强调科学必须和任何观察者的存在无关。这导致他否认时间作为不可逆性、作为演变的真实性。反之，泰戈尔主张即使存在着绝对真理，它也是人的思维所难以接近的。非常奇怪，当前科学的演变正朝着这位伟大的印度诗人所说的方向前进。无论我们把实在叫作什么，它只是通过我们所参加的活动结构而被揭示给我们的。这正像科塔里(D.S.Kothari)简单明了地表达的：

“简单的事实是，没有一种相关的理论框架，就不可能有测量、实验与观察。”

2 时间与时代

时间基本上是一种几何参数，它使得遵循一系列动力学态的相继展开成为可能，这种主张在物理学中已经存在了三百多年了。埃米尔·迈耶森*试图把近代科学的历史描述成他所认为的人类推理的一种基本范畴的逐渐实现：不同的和变化着的东西必须被约化成同一的和永恒的东西。时间必须被消去。

距现今再近一点，爱因斯坦似乎成了这种朝着某种物理表述发展的驱动力的化身，在这种表述中不考虑那种在基本层次上的不可逆性。

1922年4月6日在巴黎哲学会上发生了历史的一幕。当时，柏格森试图捍卫共存的“生活”时间的多重性的原因以反对爱因斯坦。爱因斯坦的答复很干脆：他明确地拒绝所谓“哲学家的时间”。生活经验救不了已经被科学否定了的东西。

爱因斯坦的反应多少有些道理。柏格森显然是误解了爱因斯坦的相对论。但是在爱因斯坦一方也还有些片面之处：期间，也就是柏格森的“生活时间”，涉及演化的一些基本维，即爱因斯坦只在现象论的水平上乐于接受的不可逆性。我们已经讲到过爱因斯坦和卡尔纳普的谈话(见第七章)。对他来说，过去、现在与未来之间的差别是在物理学范畴之外的。

注意一下爱因斯坦和他年轻时候在苏黎世的最亲密朋友米歇

---

* 迈耶森(Emile Meyerson,1859—1933)，现代哲学家，生于波兰，后入法国籍。——译者

尔·贝索(Michele Besso)之间的通信是很有意思的。尽管贝索是一位工程师和科学家,但在晚年时他却越来越关心哲学、文学和那些围绕着人类存在核心的问题。他固执地一次又一次重复着那些同样的问题:什么是不可逆性?它与物理定律之间的关系是什么?爱因斯坦也一次又一次地怀着只对这位密友才表现出的耐心回答说,不可逆性只不过是由“未必有的”初始条件产生出来的一种幻觉而已。这种对话一直进行了许多年,直到这位比爱因斯坦大八岁的贝索去世为止(在爱因斯坦逝世前一个多月)*。在给贝索的妹妹和儿子的最后一封信中,爱因斯坦写道:“米歇尔已经在我之前离开了这个奇怪的世界。这并无所谓。对我们这些信念坚定的物理学家来说,过去、现在与未来之间的差别只是一种幻觉,虽然是一种长久不变的幻觉。”在爱因斯坦试图理解物理学基本定律的努力中,“可以理解的”一词指的就是“永不改变的”。

为什么爱因斯坦如此强烈地反对把不可逆性引进到物理学中来呢?对此我们只能猜测了。爱因斯坦是位相当孤独的人,他只有为数不多的朋友、同事和学生。他生活在一个悲伤痛苦的时代:发生了两次世界大战,又兴起了反犹太主义。毫不奇怪,对他来说,科学是跨过这混乱年月走向胜利的途径。但是,这与他的科学工作形成了怎样的对照!他所在的世界充满了观察者,充满了处在各种各样互相运动着的坐标系中的科学家,处在各种具有不同引力场的星球上的科学家。所有这些观察者正在通过信号进行着整个宇宙范围内的信息交换。爱因斯坦首先想保留的是这种通信的客观意义。但我们或许可以说,爱因斯坦突然停下来了,没有接受通信和不可逆性密切相关的观点。而以通

* 贝索1955年3月15日在日内瓦逝世,爱因斯坦1955年4月18日在美国普林斯顿逝世。——译者

信为基础的逐渐增加知识，大概是人类思维所能接近的最不可逆过程。

3 熵 垒

在第九章中，我们把第二定律描述成是一种选择原则：对于每个初始条件，都有一个“信息”与之相应。含有有限信息的所有初始条件都是可能存在的。可是要想把时间方向倒转过来，我们就必须有无限的信息；我们不能创造出一种能向我们的过去演化的情形！这就是我们已经介绍过的熵垒。

与作为信号传输最大速度的光速的概念有一个很有趣的类比。正如我们在第七章中已经看到的那样，这是爱因斯坦相对论的基本假设之一。光速壁垒的存在是给出因果意义所必需的。设我们能够乘坐一艘科学幻想飞船以大于光速的速度离开地球，那我们就能追上光信号，从而跑到我们自己的过去的前面去。同样，熵垒是给出通信意义所必需的。我们讲过，不可逆性与通信是密切相关的。诺伯特·维纳论述过，如果存在两种时间方向，将会有灾难性的后果。在这里很值得引用一下他那本名著《控制论》中的一段话：

> 的确，幻想一个理智动物，其时间方向和我们相反，是一个非常有趣的智力实验。这个动物和我们之间的一切通信都是不可能的。他发出的任何信号到达我们这里的时候，逻辑的顺序改变了：在他看来是结果的部分，在我们看来却是原因。这些原因应该都在我们的经验中出现过，我们很自然地就用它来解释他的信号，并不去设想这是由一个有理智的动物发来的。如果他给我们画一个正方形，

我们一定会把他的最后几笔看成是最前几笔，而且他所画的正方形，在我们看来，就好像是这些笔迹的奇怪的结晶(这总是可以解释清楚的)。这个图形的意义是那么出人意外，就像我们把一个人的面孔看作高山悬崖了。这种正方形的画法对我们说来成了一种突然的变动，由于这种突然的变动，正方形不存在了。这的确很突然，但用自然定律还是可以作出解释的。我们的对方对我们也会有完全类似的想法。能够和我们通信的任何世界，其时间方向和我们相同。

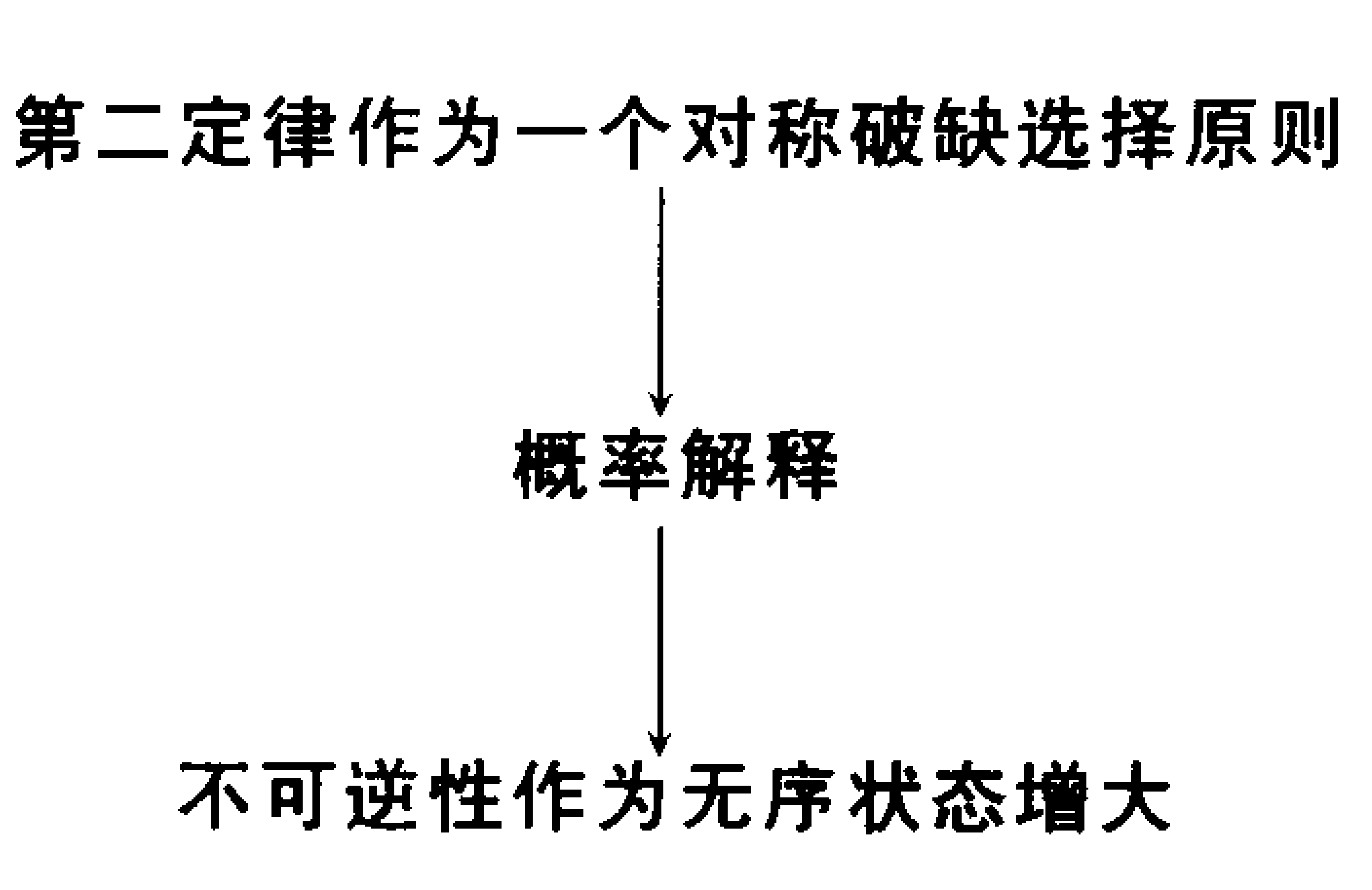
正是无限大的熵垒保证了时间方向的惟一性，保证了不可能把时间从一个方向切换到相反方向。

在本书中，我们已经强调指出，不可能性的证明是多么重要。事实上，当爱因斯坦把他的相对同时性概念建立在信息不可能以大于光速的速度传输的基础上时，他是第一个理解了这种重要性的人。相对论的整个理论就是围绕着排除一切“不可观察的”同时性而建立起来的。爱因斯坦把这一步骤看作有些像在热力学中采取的把永恒运动排除在外的那一步骤。但是他的一些同代人，例如海森堡，强调指出了在这两种不可能之间有一个重要区别。在热力学中，把某种状态定义为不可能在自然界中存在；而在相对论中，被定义为不可能的是观察，也就是一种对话，一种在自然界与描述它的人之间的通信。于是，当海森堡在排除了量子测不准原理所定义的不可观察的东西的基础上建立起量子力学时，他看到他自己是在按照爱因斯坦的样子做，虽然爱因斯坦所持的是怀疑态度。

只要认为第二定律不过是表达那些实际上不大可能有的事，它就

没有什么理论上的用处。你可能总是希望能有足够的技术办法来克服它,但我们已经看到这是办不到的。在它的根子上是要选择一种可能的初始状态,只有选择了初始状态之后,概率解释才成为可能。确实,像玻耳兹曼首先论述过的,熵的增大表达出概率的增大、无序的增大。但是他的这番解释是根据“熵是打破时间对称性的选择原则”这个结论做出来的。只有在经过这个对称破缺之后,某种概率解释才成为可能。

尽管我们重复了玻耳兹曼关于熵的许多解释,我们对于他的第二定律的解释的基础是根本不同的,因为我们有这样一种思路:



只是通过引进新的选择原则而把动力学与热力学统一起来,才能给第二定律赋予其作为科学进化范式的基本重要性。这一点很重要,因此我们将比较详细地来讨论它。

4 进化范式

动力学世界,无论是经典的或量子的,是一个可逆的世界。正如我们在第八章中强调的那样,任何进化都不能归因于这个世界;按动力学单位表达的“信息”仍然是个常量。所以极为重要的是某个进化范式的存在现在可以在物理学中确立起来,不仅是在宏观描述层次上,而且在一切层次上。当然,这得有一定的条件:正如我们已看到的那样,一定要有最低限度的复杂性。不过,不可逆过程的极端重要性表明,我们感兴趣的大多数系统是满足这个要求的。显然,对定向时间的理解水平

随着生物组织水平的提高而提高，很可能在人类意识中达到它的最高点。

这种进化范式究竟有多么普遍呢？它包括孤立系统(它们要演变成为无序)和开放系统(它们要演变到越来越高级的复杂形式)。毫不奇怪，熵这种隐喻已经吸引了不少作者用它去论述社会或经济问题。显然，在这里我们必须十分小心；人类并非动力学的研究对象，向热力学的过渡不能被表述成一种由动力学所保持的选择原则。在人类生存这个水平上，不可逆性是一个更基本的概念，对我们来说，它不能与我们自身存在的意义分割开。但仍然重要的是，从这个角度看来，我们不再把不可逆性的内部感觉看作是把我们和外部世界隔开的主观印象，而是看作我们参加在一个由某种进化范式统治着的世界内的标志。

宇宙论的问题相当困难。我们还不知道引力在早期宇宙中的作用是什么。能够把引力作用包括在某种形式的第二定律之中吗？或是在热力学与引力之间有着某种辩证的平衡吗？在一个时间可逆的世界里，当然不能突然现出一个不可逆性来。不可逆性的起源是一个宇宙论问题，而且要求对宇宙的最初阶段进行分析。在这里我们的目标还是别太过分。我们还是只探讨：不可逆性在今天意味着什么？它与我们在我们所描述的世界中的地位有怎样的关系？

5 演员和观众

用物理学来否定演化，这就在科学内部产生了深深的裂痕，并且使科学与哲学越来越疏远。起初作为大胆的赌注来对抗占优势地位的亚里士多德的传统的那些观点，逐渐变成了一种武断主张，它直接反对一切认为在自然界中存在着定性差别的学者(化学家、生物学家、医生)。到

了十九世纪末，这种冲突已经从科学内部转移到了“科学”与其他文化(尤其是哲学)之间的关系上。我们在第三章里论述过西方思想史的这个方面及其为完成知识新统一而进行的持续斗争。现象学家的“生活时间”，与科学的客观世界相对立的“生存世界”，都可以和为反抗科学入侵而建立起壁垒的需要联系起来。

今天，我们相信，确定性与绝对对立的时代已经过去了。物理学家已经不再掌握任何种类的“治外法权”了。作为科学工作者，他们属于他们那个文化，他们又对那个文化做出基本的贡献。我们已经达到了一种接近于在社会学里很早以前就认识了的状态：梅洛-庞蒂 * 早就强调过应当牢牢记住他所谓的一种“状态内的真理”。

> 只要我保持一种绝对观察者的理想，没有任何观点的知识的理想，我就只能把我的状态看成是一个错误的源泉。可是一旦我确认通过它使我适合所有活动和所有对我有意义的知识，确认它逐渐被可能对我有关的每一事物所充满，那么在我这个状态的有限范围内，我与社会的接触就向我显示成像是所有真理(包括科学)的起点。我们所能做的事不外就是在这个状态内部定义一条真理，因为我们已经有了一些关于真理的思想，也因为我们是在真理内部而不能到它外面去。

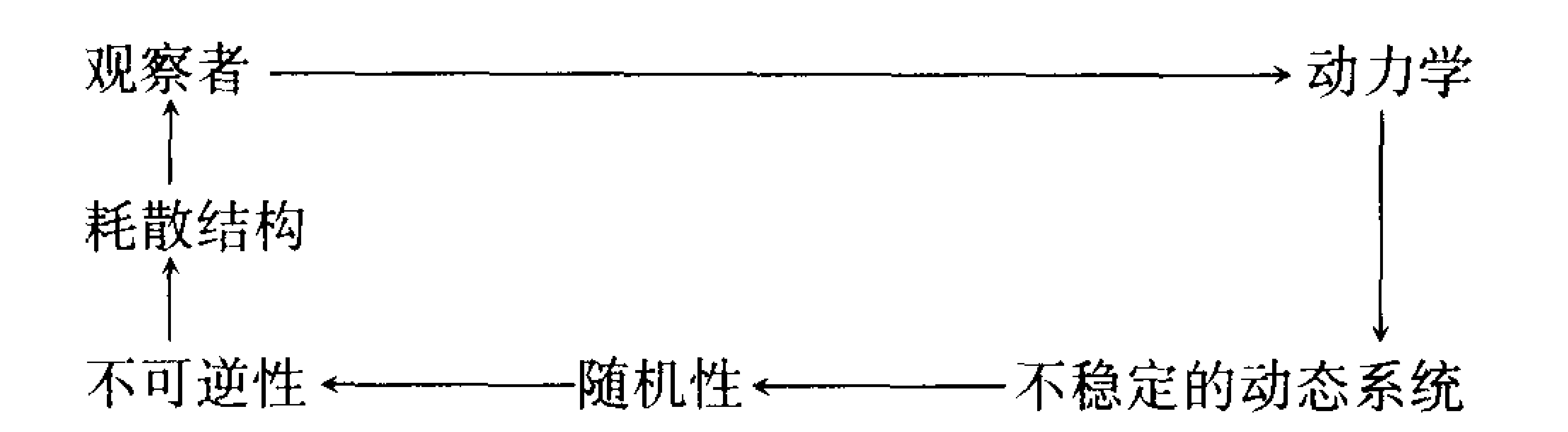
我们通过本书来探索的正是这种既作为参与者又作为旁观者的知识概念。

---

* 梅洛-庞蒂(Merleau-Ponty，1908—1961)，法国哲学家，文学家，现象学代表人物。——译者

梅洛-庞蒂在他的《主旋律》(*Themes*)一书中还断言，科学中"哲理性"的发现，科学的基本概念的转变，经常是反发现的结果，这种反发现为改变观点提供了机会和起始点。在相对论、量子力学或热力学中，各种不可能性的证明都向我们表明了自然界不能"从外面"来加以描述，不能好像是被一个旁观者来描述。描述是一种对话，是一种通信，而这种通信所受到的约束表明我们是被嵌入在物理世界中的宏观存在物。

我们可以把我们今天看到的情况概括成下面这张图的样子：



我们从观察者开始，他测量坐标和动量并研究它们随时间的变化。这就使得他发现不稳定的动态系统以及其他有关内在随机性和内在不可逆性的概念，如我们在第九章中讨论的那样。一旦我们有了内在不可逆性和熵，我们就遇到了远离平衡系统中的耗散结构，我们就能理解观察者的时间定向活动。

没有一种科学活动不是时间定向的。准备一个实验首先要求区分出"实验之前"与"实验之后"。只是由于我们知道了不可逆性，我们才能认识可逆的运动。上面那个图表明，我们现在已经走完完整的循环，我们可以把自己看作是我们所描述的宇宙的一个部分。

我们提出的这个图式并不是可以从某些逻辑结构中推演出来的那种先验图式。事实上耗散结构在自然界中的存在，没有什么逻辑上的必要性；要使宏观世界成为"观察者们"居住的世界，也就是成为一个有生命的世界，必需的是有一个远离平衡的宇宙这个"宇宙学的事实"。所以我们给出的这个图式并不与逻辑学真理或认识论真理相当，但却考虑

到了我们作为一个远离平衡世界中的宏观存在物所处的条件。而且这个图式的根本特点在于它不对描述的任何基本方式作什么假设，每一个描述层次都隐含着另一个层次，也被另一个层次所隐含。我们需要的是多重化的层次，它们都联系在一起，任何一个都不要求突出。

我们已经强调指出过，不可逆性并不是一种普适的现象。我们可以在有限的一部分空间里做出与热力学平衡态相应的实验。而且，时间尺度的重要性也是多种多样的。一块石头是按地质演变的时间尺度在变化着；人类社会(尤其是在当代)显然就有着短得多的时间尺度。我们也讲过，不可逆性是从复杂性最低的动态系统开始的。有意思的是，随着复杂性的增高，从石头到人类社会，时间之矢的作用(也就是演变节奏的作用)在增长。分子生物学表明，一个细胞中的各种东西并非以同一种方式活着。有些过程达到平衡，另一些则被一些远离平衡态的调节酶支配着。与此类似，在我们周围的宇宙中，时间之矢所起的作用也很不相同。根据这一观点，在这种时间定向活动的意义上，人类的条件似乎是单一的。正如在第九章中说的那样，在我们看来，相当重要的一点是：不可逆性(时间之矢)隐含着随机性。“时间就是建设”，这个由瓦莱利完全独立地作出的结论带来一个走到科学本身之外的信息。

6　动乱的自然界中的一个旋风

我们的社会有着范围广泛的认识手段，其中科学占有着一种对自然界进行诗一般的询问的特殊地位，——按词源学意义，诗人是一个主动的、操纵着的和探索着的“创造者”。而且科学现在能尊重它所研究的自然界。从由经典科学开始的与自然的对话(以及经典科学把自然看作

是一个自动机的观点)中，生出了一种完全不同的观点，在这种观点中，向自然界提问的活动性是它内在活动性的一部分。

正如我们在本章开头所写的那样，我们关于智力的安全感已被粉碎了。我们现在能够以非争辩的方式正确评价科学与哲学的关系。我们讲到过爱因斯坦与柏格森的冲突。柏格森在某些技术要点上无疑是"错的"，但他作为一个哲学家的任务是试图在物理学内部使时间的一些他认为被科学所忽略的方面成为明显的。

对这些看来既是科学的又是哲学的基本概念的含意和一致性进行探索，可能是件冒险的事，不过它在科学与哲学的对话中却可能是大有成果的。让我们简要地引用一下莱布尼兹、皮尔斯、怀特海和卢克莱修的观点来说明这件事。

莱布尼兹引进了一个"单子"的陌生概念，这指的是一种不进行通信的物理实体，"它没有任何窗口可供东西进出"。他的观点常常被认为疯狂而不予考虑，然而就像我们在第二章里看到的，所有可积系统的基本特点就是在这些系统中存在着一种变换，这种变换可以用非相互作用实体来描述。这些实体通过它们的整个运动改变着自己的初始状态，但同时就像单子一样，和其他实体共存于一种"预先建立"的和谐之中；在这种表示下，每个实体的状态尽管完全自己确定，却也反映了整个系统直至最小细节的状态。

因此，所有可积系统都可以看成是"单子"系统。反之，莱布尼兹的单子论也可以翻译成动力学语言，就是：宇宙是一个可积系统。这样，所谓单子论就成了对一个去掉了演化的宇宙的最重要的表述。考虑到莱布尼兹为理解物质活性所作出的努力，可以衡量十七世纪与我们时代之间的差距。那时工具尚未准备好；在一个纯机械宇宙的基础上，莱布尼兹不可能说明物质活性。但是他的某些思想，物质是活性的思想，宇

宙是一个相互联系的单元的思想，仍然和我们伴随，并在今天采取了新的形式。

很抱歉，我们不能用更多的篇幅去谈及皮尔斯的工作，不过至少要引用他的一段很引人注意的文字：

> 关于能量的耗散，你们已经都听说了。已经发现，在能量的一切转变中，有一部分转为热量，而热量总是在趋向于使温度达到均匀。其结果就是，宇宙的能量依其必然规律逐渐趋向宇宙的死亡——那时将没有力，只有热，而且到处温度会一样……
>
> 可是，尽管没有什么力量能抵消这个趋势，机遇可能有和将会有对立的影响。力从长远看来是耗散的；机遇从长远看来是聚集的。能量按正规的自然规律耗散着，也正是按这些规律，伴随着越来越有利于它靠机遇而重新聚集的环境条件。所以必定有这样一个点，在这里两种趋势处于平衡，而且毫无疑问，这正是目前整个宇宙的实际情况。

我们又一次看到，皮尔斯的形而上学被认为是与现实脱节的哲学的又一例。但事实上，在今天，他的工作看来似乎正是朝着理解包含在物理定律中的多元论而迈出的开创性的一步。

怀特海的哲学则把我们带到另一个极端。对他来说，存在与演化不可分割。他写道："对于'一切都在流动着'这句话的含义的解释，是形而上学的主要任务之一。"今天，在一个世界性概念中，物理学和形而上学确实走到一起来了，在这个概念中，过程或演化被当作物理存在的第一要素，而且与莱布尼兹的单子概念不同，存在着的实体可以互相作用，

因而也就有生有灭。

经典物理学中的有序世界,或是并行变化的单子理论,类似于卢克莱修的原子通过无限空间进行的同样是并行、有序的和无休止的下落。我们已经提到过片流的趋向性和不稳定性。可是我们能走得更远。正如塞利指出的,这种无限下落提供了一个模型,我们关于引起万物出生的扰动的自然起源概念就建立在这个模型的基础上。如果垂直下落过程没有被一种趋向性"毫无理由"地打断(这趋向性导致均匀下落的原子之间的相遇和联系),就不会生成什么自然;所有重新被生成的只是在命运规律所支配的相同的原因与结果之间的反复联系。

再者,如果一切的运动
永远是互相联系着的,
并且新的运动总是从旧的运动中
按一定不变的秩序产生出来,
而始基也并不以它们的偏离
产生出某种运动的新的开端
来割断命运的约束,
以便使原因不致永远跟着原因而来,
如果是这样,那么大地上的生物
将从何处得到这自由的意志……?

人们会说卢克莱修以考古遗迹被"发明"的同样方式发明了趋向性:在开始挖掘考古遗迹之前已经有人"猜到"它们在那里了。如果只有均匀可逆的轨道存在着,那我们所产生与经历的不可逆过程又来自何处呢?自然界的开始是由一个点标志着的,在这一点轨道不再被确定,

在这一点上支配着有序和单调的决定论变化的世界的命运规律中断了。这个点也标志着一门新科学的开始，这门科学论述自然存在物的出生、增殖与死亡。“下落的物理学、重复的物理学、严密联系的物理学被有创造力的关于变化与环境的科学所取代。”“命运规律”被“自然法则”所取代，这个“自然法则”正像塞利强调的那样，既意味着自然“规律”(局部的、奇异的、历史上的联系)，也意味着一种“联盟”——与自然界的一种合作形式。

于是我们在卢克莱修的物理学中再次发现了我们在近代知识中发现的那种联系，这是在作为物理学描述的基础与作为关系到人在自然界中的地位的哲学、伦理学或宗教概念的基础的选择之间的联系。普遍联系的物理学处在与另一门科学对立的地位上，这门科学以法律和统治的名义不再和扰动或随机性进行斗争。而从阿基米德到克劳修斯的所有经典科学都是与关于湍流和关于分叉变化的科学相对立的。

正是在这里，希腊人的智慧达到了它的一个顶峰。人在世界中，同时人也是世界的，人在物质中，同时人也是物质的，他不是个陌生者而是一个朋友，是大家庭中地位平等的一员。他与万物之间有着一种协议。相反，其他许多系统和科学都是建立在打破这种协议的基础上的。对于世界，对于黎明，对于天空，对于一切事物，人都是陌生者。他憎恶这一切，与这一切作斗争。他的环境是一个危险的敌人，需要与之战斗，需要把它征服……。伊壁鸠鲁和卢克莱修生活在一个和谐的宇宙中，在那里物的科学与人的科学完全一致。在这个动乱的自然界中，我则是一个扰动，一个旋风。

7 在同义反复之外

经典科学的世界是这样的一个世界，能在这个世界里发生的任何事件都是可以根据系统瞬时状态推断出来的。奇妙的是，这个概念就是追溯到伽利略和牛顿的时代，在当时也不是什么新鲜事。的确，它可以看成就是亚里士多德的神圣和不变天国的概念。按亚里士多德的观点，只有这个天上的世界可望运用精确的数学来描述。我们在导论中曾经重复过这样的抱怨，即科学已经使这个世界"解除迷惑"。但是这个迷惑的解除，却是悖谬地由于对地上世界的推崇，使得这地上的世界值得某种智力的追求，而这是亚里士多德为天上世界保留的。经典科学不承认演化和自然界的多样性，这两点被亚里士多德看作是月下尘世的属性。在这个意义上，经典科学把天带到了地。但这显然并不是近代科学奠基者们的意愿。在向亚里士多德关于"自然是在数学完结之处开始的"的看法挑战时，他们并未想去发现隐藏在变化后面的不变的东西，而是把变化着的、会腐朽的自然界扩展到宇宙边界。在《关于两大世界体系的对话》一书中，伽利略表示对下面这种见解很吃惊：如果在那大洪水之后只留下一片冰海，或是如果地球具有不易腐朽的碧玉的硬度，那这个世界将是一个更高尚的地方；让那些认为地球在被变成晶球后会变得更美的人被美杜莎的目光盯成金刚石雕像吧！

最早的物理学家们选择了一些物体来探索定量描述的有效性，如作保守运动的理想摆，简单机械，行星轨道等等，但发现这些物体与某个惟一的数学描述相对应，这个描述实际上重复了亚里士多德天体的神明理想。

与亚里士多德的上帝类似，经典动力学的对象只和它们自己有关。它们不会从外界学到任何东西。在任何瞬间，系统中的每个点都知道它

需要知道的一切——即质量在空间的分布以及它们的速度。每个状态都包含着与所有其他可能状态有关的全部事实，每个状态都可以用来预言另外的状态，而不论它们在时间轴上各自的位置如何。在这个意义上，这种描述导致一种同义反复，因为过去与未来都包含在现在之中。

现代科学观点上那种向非永恒性过渡、向多样化过渡的根本性改变，可被看作是一种把亚里士多德的天带到地的逆转。而如今我们正在把地带到天。我们正在发现时间与变化的首要地位，从基本粒子的层次到宇宙学模型的层次。

所以无论是在宏观层次还是在微观层次，自然科学已经使自己摆脱了一种客观现实的概念，这种概念意味着必须把新颖性和多样性在不变的普适规律的名义下排除出去。它们已经使自己摆脱了一种对被认为是封闭的理性和被认为是几乎获得的知识的强烈爱好。它们现在已经向那些意想不到的东西开放，不再把它们看作是知识上不完整或控制上欠缺的结果了。

科学的这种开放已经被塞奇·莫斯科维奇定义为“开普勒革命”，以区别于那种坚持绝对观点思想的“哥白尼革命”。在本书导言中引用的许多段落中，我们把科学比作世界的“解除迷惑”。我们现在再来引用一下莫斯科维奇关于今天科学正在继续进行的变化的描述：

> 科学已被卷入这场冒险，我们的冒险，为了更新它接触到的每件事物，为了使得它渗透的一切——我们所在生活的地球和能让我们生存的真理——都变得有生机起来。每一次我们听到的都不是死亡的回声，不是宣告逝去的钟声，而是人类和物质性再生和重新开始的声音，是在它们短暂的永恒中重新固定一瞬的声音。这就是为什么伟大发现不是像哥白

尼的发现那样到灵床上才揭示出来而是像开普勒的发现那样在充满梦幻和激情的大路上呈现出来的原因。

8 有创造性的时间进程

人们常说,如果没有巴赫,就不会有"圣·马太受难"那回事,可是如果没有爱因斯坦,相对论仍然会被发现。与艺术史中所包含的不可预知性大为不同,科学被认为有一个决定论的进程。当我们回顾科学发展的奇怪历史时(我们已经概略叙述了其中三百年来的情况),可能会怀疑上述那种断言的有效性。有一些明显的例子,说明由于当时没有准备好了的文化气候把一些事实并到一个一致的模式中去,使这些事实被忽略了。化学钟的发现大概可以一直追溯到十九世纪,可是它的结果却似乎与均匀地衰退到平衡态的思想相矛盾。陨星被从维也纳博物馆中扔出来,是因为在太阳系的描述中没有它们的位置。我们的文化环境在我们所提出的这些问题中起着积极的作用,但是在风格与社会接受能力的问题之外,我们能够识别每一代都在注意的若干问题。

时间问题肯定是这些问题之一。这里,我们有点儿不同意托马斯·库恩(Thomas Kuhn)关于"常规"科学形成问题的分析。在现代大学里,研究工作与对未来的研究人员的培养教育是结合在一起的,在这样的大学里考虑问题时,科学活动和库恩的观点相当一致。而如果作为一般意义上对科学的描述(这描述导致关于知识一定是什么的结论),库恩的分析就可以被约化为科学发展的实证主义概念的一种新的心理社会模式,就是说,越来越专门化和间隔化;"常规"科学行为和"严肃"、"沉默"的研究者(他绝不在有关他的研究的总意义的"一般"问题上浪费时间,而是盯住那些专门化的问题)的行为等同;以及科学发展对于文化、经济和社会问题的基本独立性。

在十九世纪，出现了使库恩所描述的“常规科学”得以实现的学院式结构。库恩强调，以练习的方式反复解答上一代人的范式问题，学生就能学习到作为研究基础的那些概念。按这种方式就能给予他们一些判据，使他们能确定某个问题是否有益，某个答案是否可以接受。这样就形成了一步一步地从学生到研究人员的过渡。科学家们也使用同样的技术继续去解决问题。

库恩的描述与我们这个时代最有关。可就是在这个时代，它也只涉及科学活动的一个特殊方面，这个方面的重要性随着具体研究人员与研究所的环境而改变着。

按照库恩的观点，一个范式的变换似乎是一种危机：不再保持一种无声的和几乎看不到的规则，取代沉默不语的是实际上在做的对原来范式的质询。不再作那种异口同声式的和谐工作，这个科学团体中的每个成员都开始问一些“基本”的问题并向目前方法的合理性提出挑战。经过训练达到整齐一致的小组现在开始多样化起来：观点上的、文化经历上的和哲学信念上的不同现在被表达出来，而且常常在新范式的发现过程中起决定性作用。新范式的出现进一步增加了辩论的激烈程度，各种竞争着的范式都要被加以检验直到学术界决定谁是胜利者。随着新一代科学家的出现，再一次出现沉默和一致，新的教科书写出来了，事情又一次变得“理所当然”了。

按照这种观点，隐藏在科学革新后面的推动力倒是科学团体的猛烈的保守行为，它们顽固地把同样的概念、同样的技术加给自然界，却总是以遇到自然界同样顽固的反抗而宣告结束。当自然界最后被看成拒绝用已被接受的语言表达它自己时，危机就猛烈地爆发了。这种猛烈性是由于信念被打破而引起的。在这个阶段，所有智力资源都被集中来研究一种新语言。于是科学家们不得不对付这些违反他们的意志而强

加给他们的危机。

我们已经研究的问题引导我们去强调那些与库恩所描述的大不相同的方面。我们已经详细论述了连续性，不是“明显的”连续性，而是那种包含着种种难题的隐蔽式的连续性。这些难题一直被许多人斥为不合理、不真实，却又被一代又一代的人们重提出来。例如：复杂系统的动力学，化学和生物学的不可逆世界与经典物理学所提出的可逆描述之间的关系，等等。事实上我们对这些问题能引起兴趣并不感到惊奇。对我们来说，更确切的是要理解，在狄德罗、斯达尔、维耐尔和其他人的工作之后，这些问题怎样一直被忽略。

过去一百年已经被一些危机打上标记了，这些危机与库恩给出的描述相当一致。其中没有一个被科学家探求过。发现基本粒子的不稳定性和发现演变中的宇宙就都是例子。但是，一系列问题又成了近年来科学史的特点，这些问题是被那些知道问题既有科学一方面又有哲学一方面的科学家们提出来的深思熟虑和明白清楚的问题的推论。所以科学家们并非注定要作出像“睡子”那样的行为的！

重要的是应当指出，我们描述过的科学新进展(把不可逆性纳入物理学)并不被看作是某种“意外”，使占有它的人会因此而与他自己所处的文化世界分开。反之，这个发展清楚地反映出科学的内部逻辑和我们时代文化和社会的发展脉络。

特别是，在物理学中重新发现时间这件事正好发生在人类历史发展极其迅速的时候，这怎么能被看成是偶然的呢?文化上的约束不能作为全部答案，但也不能被排斥。我们必须把关于产生科学概念的“内部”和“外部”决定因素间的复杂关系结合起来。

在本书序言中，我们曾强调过，它的法文名字《新的联盟》表示“两种文化”走到一起来了。可能这种合流在任何地方也没有像在我们在本

书第三编中讨论过的不可逆性的微观基础的问题中那样清楚。

正如我们反复提到的，经典力学和量子力学都基于任意的初始条件和决定论法则(对于轨道或波函数)。在某种意义上说，定律使得在初始条件中已经存在的东西变得十分明显。当考虑不可逆性时，情形便不再如此。从这个角度来看，初始条件是从以前的演变中生成的，并通过以后的演变被变成同一类别的状态。

因此，我们更加接近西方本体论的中心问题：存在和演化之间的关系。我们已在第三章对此问题作了简要说明。值得注意的是，在本世纪最有影响的著作中，有两部书就正是讨论这个问题的。我们想起怀特海的《过程与实在》和海德格尔的《存在与时间》。在这两种情形中，目的都是要跟随自从柏拉图和亚里士多德以来的西方哲学的主流，超出把存在和没有时间视为等同的范围。

但明显的是，我们不能把存在约化为时间，我们不能讨论一个缺乏时间内涵的存在。不可逆性的宏观理论所取的方向为怀特海和海德格尔的推测给出了新的内容。

进一步详述这个问题将超出本书的目标；我们打算在别处去做这事。让我们注意，在系统某一状态所概括出来的初始条件是和存在联系在一起的；相反，涉及时间变化的那些定律则是和演化相联系的。

在我们看来，存在和演化并非是彼此对立的，它们表达出现实的两个有关方面。

一个时间对称破缺的态是从一个时间对称破缺的定律中得出的，该定律把该态传播到属于同一范畴的态。

在最近的一本专著(《从存在到演化》)中，本书作者之一把下面这段话作为结论："对于经典科学的大多数奠基者——甚至爱因斯坦——来说，科学乃是一种尝试，它要越过表面的世界，达到一个极其合理的没

有时间的世界——斯宾诺莎的世界。但是,也许有一种更为精妙的现实形式,它既包括定律,也包括博弈,既包括时间,也包括永恒性。”

这正是不可逆过程的微观理论正在采取的方向。

9 人类的条件

我们完全同意赫尔曼·魏尔的话:

> 如果科学家忽略了这样的事实,即理论结构并非研究生命现象的惟一方法,那是错误的;另一种方法,即从内部(解释)去理解的方法,也对我们开放着……。对于我自己,对于我自己的知觉、思想、意志、感情和行为等活动,我有一种直接的知识,和用符号代表“并行”大脑过程的理论知识完全不同。这个对自己的内部知觉乃是我理解我所遇到的同伴的基础,我确认这些同伴是和我同样的存在物,我跟他们进行交流,有时会如此亲密,好像要去分享他们的快乐,分担他们的烦恼。

但是,到最近为止,一直有一种值得注意的对比。外部世界像是遵守决定论因果律的一个自动机,同我们经历的自发活动和不可逆性形成了鲜明对照。这两个世界现在正越来越靠近在一起。这是自然科学的一种损失吗?

经典科学的目标是达到一种对物理世界的“透明”的观点。在每种情形中你都能辨别出原因和结果来。只要随机描述成为必要的,情况就不再这样。我们不再能谈到每一次实验的因果性,我们只能谈统计的因果性。事实上,自从量子力学诞生起,就一直是这样,不过,在最近的一

些发展中这一点被放大了，最近的发展表明，随机性和概率甚至在经典动力学或化学中也起着主要的作用。因此，现代的倾向和经典倾向相对比，引出一种“不透明性”，和经典思想的透明性形成对比。

这是人类思维的一个失败吗?这是个困难的问题。作为科学家，我们没有任何选择；我们不能向你把这世界描述成我们愿意看到的那样，而只能描述成如我们能通过实验结果和新理论概念的联合作用所看到的那样。我们也相信，这种新情况反映出我们像是要在我们的精神活动中找到的那种情况。经典心理学以意识活动即透明的活动为中心；现代心理学为非意识的不透明功能增加了很大的分量。也许这是人类存在的基本特点的一种形象。请记起俄狄浦斯(Oedipus)来，在斯芬克斯面前他的思维是那样清晰，而当他面对自己的身世时又是那样愚钝和昏暗。也许，我们对我们周围的世界和我们内部的世界的洞察一起到来，正是我们要描述的科学的最近演变的一个令人满意的特点。

很难不得出这样的印象：一方面是在时间中存在的东西，不可逆的东西，另一方面是在时间之外的东西，永恒的东西，这两者之间的区分正是在人类符号活动之始。也许在艺术活动中尤其这样。确实，一个自然客体，一个石头，在它转变成一个艺术对象时，转变的一个方面是和我们对物质的作用密切相关的。艺术活动打破了该客体的时间对称性。它留下了一个标志，这个标志把我们的时间不对称性翻译成该客体的时间不对称性。从我们所在生活的可逆的、近乎循环的噪声水平中响起了同时是随机的又是时间定向的音乐声。

10 自然的更新

十分值得注意的是，我们正处在这样的一个时刻，关于自然的科学

概念发生着深刻的变化，与此同时，由于人口的爆炸，人类社会的结构也发生着深刻的变化。于是，人和自然之间以及人和人之间都需要有一种新关系。我们不再能接受在科学价值和伦理价值之间的那种古老的先验区分。当外部世界和我们的内部世界像是要冲突并要几乎正交的时候，这种区分是可能的。今天我们知道，时间是一种建设，因此负有一定的伦理责任。

在本书中我们花了很大篇幅去讨论的思想——不稳定性的思想，涨落的思想——扩散到社会科学中。现在我们知道，社会是极为复杂的系统，包含着潜在地巨大数目的分叉，以在一段相对短的人类史中演变的各种文化为例证。我们知道，这样的系统对涨落高度敏感。这既引出希望，也引出一种威胁。说希望，是因为哪怕是小的涨落也可能增长并改变整个结构。结果，个别活动不是注定不重要的。另一方面，这也是一种威胁，因为在我们的宇宙中，稳定的、永恒的规则的安全性似乎一去不复返了。我们正生活在一个危险的和不确定的世界中，它不唤起任何盲目的信念，也许只能唤起和犹太教法典的某些条款看来归因于《创世记》的上帝的那种合格希望相同的感情：

> 二十六种尝试发生在今天的创生之前，所有的尝试都注定地失败了。人的世界是从先前的碎片的混沌中心出现的，他也暴露在失败且无任何回报的危险面前。“让我们希望它工作吧！”上帝在创造这个世界时这样呼喊过。这个希望（和这世界及人类的所有后来的历史相伴）恰从一开始就强调了：这个历史被打上了根本的不确定性的印记。

译后记：迎接新的科学革命，建立新的自然观*

(一)

十九世纪末二十世纪初，以物理学革命为先导，爆发了一场震撼世界的科学革命。这场革命使科学从经典科学进入现代科学，促使人们的自然观、科学观和思维方式发生了巨大的变革。现在又值世纪之交，许多科学家正在讨论二十世纪末到二十一世纪初是否又会产生一场新的科学革命。不少人在探索科学革命的突破口，有人认为是人体科学、思维科学，有人主张是生物学，有人相信是天体物理和粒子物理学，还有的人猜测是最近取得突破性进展的超导，众说纷纭，莫衷一是。

比利时著名科学家、诺贝尔奖金获得者，耗散结构理论的创始人普里戈金教授和他的学生、同事、科学哲学博士斯唐热女士合著的关于自然科学哲学的新著《从混沌到有序》也探讨了这个问题。作者在书中首先讨论了牛顿的《自然哲学的数学原理》出版三百年来科学发展的历史进程，将科学的演进放到一定的社会文化背景中加以考察，总结了以牛顿为代表的近代科学的成就与不足。作者指出，牛顿的一个伟大功绩是

把亚里士多德的天上世界和月下世界统一起来，揭示了天上和人间都服从同样的引力定律和运动定律。经典科学给我们描绘的是一幅静态的、简单的、可逆的、确定性的、永恒不变的自然图景，形成了一种关于"存在"的机械自然观。但是，人们在自己生活的世界里看到的却是地质变迁、生物进化、社会变革这样一幅动态的、复杂的、不可逆的、随机性的、千变万化的自然图景，形成的是一种关于"演化"的自然观。这就造成了人与自然的分裂，形成了两个世界、两种文化、两类科学的对立。这种对立涉及到以下一些带根本性的问题：①时间是可逆的还是不可逆的，即是否存在"时间之矢"的问题；②自然界的演化如果有方向性即存在"时间之矢"的话，那么这种方向是进化还是退化，是从混沌到有序还是从有序到混沌，即克劳修斯的热寂说和达尔文的进化论的矛盾问题；③自然界的发展是确定性的还是随机性的，是服从动力学规律还是统计学规律，即必然性与偶然性的关系问题。一百多年来，这些问题一直困惑着科学家和哲学家，发表的论文上千篇，但至今没有完全解决。《从混沌到有序》的作者经过多年的研究(普里戈金说这些问题耗费了他大半生的精力)，分析了三百年来科学和哲学发展的历史，特别是研究了复杂性的科学——热力学一百多年来的进展，根据耗散结构理论等非平衡系统自组织理论以及宇宙论和粒子物理学的最新成果，对这些问题从科学上和哲学上作出了自己的回答。书中对热力学第二定律的内容、意义作了新解释，强调"熵增加原理"和相对论的光速不可超越，量子论的能量不能无限分割的原理具有同等重要的意义。要重新发现时间，要把不可逆性嵌入到动力学中去，建立一种容许在过去和未来之间作出区别的动力学系统的特殊结构。作者认为，今天我们应当把动力学和热

---

* 本文原载《光明日报》1987年9月24日第3版，获《光明日报》、《中国图书评论》主办的全国图书评论征文二等奖。

力学、物理学和生物学、自然科学和人文科学、西方文化和东方文化结合起来，在更高的基础上建立起人与自然的新的联盟。牛顿在300年前所完成的统一实质上是把“地”统一于“天”、地成为“天”的一部分。“经典科学不承认演化和自然界的多样性。这两点被亚里士多德看作是月下世界的属性，在这个意义上，经典科学把天带到了地”（《从混沌到有序》第279页）。今天，新的统一不再是把“地”统一于“天”，而是把“天”统一于“地”。作者指出，宇宙早期的大爆炸、基本粒子不稳定性、非平衡热力学描述的混沌与有序的相互转化，从宇观、宏观到微观都说明自然界（“天”）不是永恒不变的，而是同生物和人类一样，有其真实的历史。“现代科学观点上那种向非永恒性的过渡，向多样化过渡的根本性改变，可被看作是一种把亚里士多德的天带到地的逆转，而如今我们正在把地带到天。”（第280页）这是一种新的“天人合一”论。

有人认为，二十世纪物理学主要是对无穷大和无穷小的探索，除了宇宙的起源和演化，基本粒子的结构和稳定性等问题尚未完全弄清楚外，对于我们自身的世界即宏观世界已没有什么东西再能使我们惊奇了。英国著名天体物理学家霍金甚至宣布了“理论物理学的终结”。作者在本书中不同意这种认识到头的观点。指出当前科学发展的一个重要方向就是对宏观世界复杂性的探索，在这方面已经取得了重要成果。“对我们居住的世界的探索，就如同对无穷大和无穷小的惊人发现一样，充满着意想不到的事情和新的前景。各门科学都还是处在它的起步阶段。”（本书法文版1986年再版前言）近年来关于混沌物理学的研究表明，过去被认为是确定论的和可逆的某些力学方程，却具有内在的随机性和不可逆性。确定论的方程可以得出不确定的结果，这对传统观念无疑是一个巨大的突破。作者在书中反复强调的不可逆性、多样性、不稳定、不平衡、非线性、暂时性以及通过自组织从混沌达到有序等思想，被

托夫勒认为“是最近一次科学革命的中心”，“是当今科学历史性转折的一个标志。”虽然作者一再声明“我们知道我们的答案是多么不完善，我们目前的理论会引起多么无法预见的问题。”但是，本书所包含的新的思想，提出的新问题，对于我们迎接二十世纪末二十一世纪初即将到来的新的科学革命，建立新的自然观和科学观无疑有重要的启示。

(二)

本书断断续续翻译了六年，1979 年 8 月普里戈金教授来华讲学。在西安与译者见面时，谈及他与他的学生、助手斯唐热女士合写了一本关于耗散结构理论的哲学问题的著作。经商定由我们将它译成中文出版。他回国后不久即如约寄来此书的法文版，书名为《新的联盟》(*La Nouvelle Alliance*)，稍后又寄来此书的英文打字稿。我们随即按照英文打字稿开始了此书的翻译工作。1984 年，在法文版出了五年之后，此书的英文版才由美国矮脚鸡图书公司发行。作者在英文版中对书的内容作了较大修订，增加了近几年研究的新成果，例如对微观和宇观的不可逆性的新的探索，对宏观现象和规律的新认识，等等(见作者序)。书名亦改为《有序来自混沌》(*Order out of Chaos*)，并约请托夫勒写了前言。作者还专为中译本另写了一个序言，在序言中再次表达了对中国传统文化的尊敬和对中国人民的友好情谊。在书中还引用了中国学者郝柏林教授最近的工作。根据普里戈金寄来的新的英文版本，我们又对原有译文重新作了修订，并将书名改译为《从混沌到有序》，这主要是为了通俗易记，也便于与我们翻译的普里戈金教授的另一本著作《从存在到演化》匹配(这两本著作实际上是姊妹篇)。这一译名是否妥帖，还望读者不吝指教。

前几年，国内翻译出版了好儿本普里戈金本人的以及他和他的同

事合写的关于耗散结构理论的著作，如《普里戈金与耗散结构理论》、《非平衡系统的自组织》、《从存在到演化》、《探索复杂性》。将本书与这些著作结合起来阅读，可以对耗散结构理论的来龙去脉、主要内容、最新进展以及它在科学和哲学发展上的意义有一个比较全面而系统的了解。

由于本书涉及的历史漫长，专业广泛，人物众多，文字又富于哲理和文采，而译者的专业和文字能力则有未逮，因此译本中错误疏漏之处在所难免，衷心希望广大读者批评指正。

承蒙陈以鸿先生校阅了全书译稿，韩劼同志助译了部分章节，在此深表谢意。